



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

“Estudio y parametrización de un generador termoeléctrico”

TFG presentado para optar al título de GRADO en
INGIENERÍA MECÁNICA

por **Albert Rof Ballús**

Barcelona, 9 de Junio de 2015

Tutor proyecto: Hernán Alberto González Rojas

Departamento de Mecánica (D712)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Índice

RESUMEN	1
RESUM	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. HISTORIA	5
3. APLICACIONES	6
4. TEORIA	8
4.1 CONCEPTOS	8
4.1.1 Semiconductores	8
4.1.2 Unión P-N	9
4.2 FENÓMENOS IMPLICADOS	10
4.2.1 Efecto Seebeck	10
4.2.2 Efecto Peltier	12
4.2.3 Ley de Ohm y Potencia eléctrica.....	13
4.2.4 Efecto Thomson	14
4.2.5 Relaciones de Thomson	15
4.2.6 Efecto Joule	17
4.2.7 Conducción de calor y Ley de Fourier	18
4.3 FUNCIONAMIENTO	19
4.4 BALANCE ENERGÉTICO	22
4.4.1 Balance de energías en la celda	22
4.4.2 Pérdidas energéticas en el recipiente.....	24
4.5 CONCEPTOS DEL MODELO ELÉCTRICO	27
4.5.1 Teorema de Thévenin.....	27
4.5.2 Parámetros a evaluar	29
5. CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE LA CELDA PELTIER	35
5.1 COMPONENTES	35
5.1.1 Componentes auxiliares	35
5.1.2 Elementos del circuito eléctrico primario	38

5.1.3	Elementos del circuito eléctrico secundario	39
5.1.4	Instrumentos de medición	42
5.2	INSTALACIÓN	44
5.2.1	Circuito eléctrico primario	44
5.2.2	Control de la temperatura	45
5.2.3	Circuito eléctrico secundario.....	46
5.3	FUNCIONAMIENTO.....	47
6.	TOMA DE DATOS	50
6.1	CALCULO DEL TIEMPO DE PREPARACIÓN	51
6.2	CURVAS DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA	52
6.2.1	Metodología	52
6.2.2	Observaciones y mejoras.....	54
6.3	CURVA DE VOLTAJE EN VACÍO EN FUNCIÓN DE TEMPERATURA	56
7.	RESULTADOS.....	57
7.1	RESISTENCIA INTERNA.....	57
7.2	RESISTENCIA ÓPTIMA	59
7.3	VOLTAJE EN VACÍO	60
7.4	COEFICIENTE DE SEEBECK	61
7.5	POTENCIA MÁXIMA	62
7.6	EFICIENCIA DE LA CELDA PELTIER.....	63
7.7	COMPORTAMIENTO DE LA CELDA EN FUNCIÓN DE ΔT Y R_T	65
8.	PRESUPUESTO	67
9.	PROPUESTAS DE SEGUIMIENTO DEL TRABAJO.....	69
10.	CONCLUSIONES.....	70
11.	BIBLIOGRAFÍA	71
12.	ANEXO	72
12.1	DATOS OBTENIDOS EN LOS EXPERIMENTOS.....	72
12.1.1	Datos para potencia suministrada de 40W.	72
12.1.2	Datos para potencia suministrada de 50W.	73
12.1.3	Datos para potencia suministrada de 53W.	74
12.1.4	Datos para potencia suministrada de 55W.	75
12.1.5	Datos para potencia suministrada de 58W.	76
12.1.6	Datos para potencia suministrada de 60W.	77

12.1.7 Datos para potencia suministrada de 65W.	78
12.1.8 Datos para potencia suministrada de 68W.	79
12.2 FICHA TÉCNICA DE LA CELDA PELTIER UTILIZADA	80

RESUMEN

En este trabajo se estudia la posibilidad de utilizar un elemento termoeléctrico (ETE), como es una célula Peltier, para la generación de energía eléctrica. El ETE actuará como un recuperador de calor. Para ello, se desarrolla un modelo que permite predecir el comportamiento del ETE en un régimen de funcionamiento estacionario.

Este modelo relaciona el flujo de calor que pasa a través del ETE con la energía eléctrica que se puede generar. Con dicho modelo se determinarán las condiciones óptimas de funcionamiento y la carga para obtener el máximo rendimiento del ETE. Las constantes del modelo son determinadas experimentalmente, para ello se desarrolla y construye un dispositivo para realizar experimentos controlados del calor que fluye a través del ETE. Se ha podido comprobar que el dispositivo experimental funciona correctamente, el ETE genera energía eléctrica y se han podido encontrar las distintas constantes que caracterizan el modelo desarrollado del ETE, constante de Seebeck, conductividad térmica, resistencia interna y tensión en vacío. Con todo ello, se ha desarrollado una metodología para caracterizar células Peltier en la generación de energía eléctrica.

RESUM

En aquest treball s'estudia la possibilitat d'utilitzar un element termoelèctric (ETE), com és una cèl·lula Peltier, per a la generació d'energia elèctrica. L'ETE actuarà com un recuperador de calor. Per a tal propòsit, es desenvolupa un model que permet predir el comportament de l'ETE en un règim de funcionament estacionari.

Aquest model relaciona el flux de calor que passa a través de l'ETE amb l'energia elèctrica que es pot generar. Amb aquest model es determinaran les condicions òptimes de funcionament i la càrrega per obtenir el màxim rendiment de l'ETE. Les constants del model són determinades experimentalment, per a això es desenvolupa i construeix un dispositiu per realitzar experiments controlats de la calor que flueix a través de l'ETE. S'ha pogut comprovar que el dispositiu experimental funciona correctament, l'ETE genera energia elèctrica i s'han pogut trobar les diferents constants que caracteritzen el model desenvolupat de l'ETE, constant de Seebeck, conductivitat tèrmica, resistència interna i tensió en buit. Amb tot això, s'ha desenvolupat una metodologia per caracteritzar cèl·lules Peltier en la generació d'energia elèctrica.

ABSTRACT

In this project the possibility of using a thermoelectric element (TEE) like a Peltier cell is studied for generating electricity. The TEE will act as a heat recovery system. For this, a model to predict the behavior of TEE under a stationary operation is developed.

This model relates the heat flux passing through the TEE with the electrical power that can be generated. With this model the optimum operating conditions and the load is determined to get the maximum efficiency of the TEE. The model constants are determined experimentally, so a device is developed and built for performing controlled experiments of heat flowing through the TEE. It has been found that the experimental device works properly, the TEE generates electricity and have been able to find different constants characterizing the model developed from the TEE, Seebeck constant, thermal conductivity, internal resistance and load voltage. With all this, it has been developed a methodology to characterize Peltier cells to generate electricity.

1. INTRODUCCIÓN

En tiempos dónde cada vez es más cara y a la vez necesaria la energía que usamos a diario, cualquier Joule cuenta y se debe extraer la máxima energía posible de nuestro combustible. A pesar de tratarse de sistemas complejos y de elevado coste económico, en los últimos años se han incrementado los recuperadores de calor pues el coste que comportan ya ha sido superado por el coste que supone tener unas instalaciones ineficientes que no obtienen el máximo rendimiento de la fuente energética que usan.

A lo largo de la historia, muchos han sido los sistemas propuestos para obtener energía del calor generado involuntariamente y como subproducto de otros procesos.

Uno de estos sistemas cada día más presente es la placa PELTIER que se basa en el efecto Seebeck a fin de generar energía a partir de un gradiente de calor, o viceversa ya que su funcionamiento es reversible. Este trabajo se centrará en la primera de las mencionadas utilidades.

Se construye un dispositivo para evaluar la eficiencia en la conversión de energía de una placa Peltier. Con dicho dispositivo se realizarán una serie de experimentos para observar y estudiar su comportamiento en diferentes situaciones tanto de carga como de diferencia de temperaturas. Permitiendo con ello caracterizar una placa Peltier como recuperador de energía, y de allí sacar unas conclusiones que ayudarán a conocer y deducir sus posibles utilidades a nivel industrial y/o doméstico.

2. HISTORIA

El primero en observar el fenómeno de la termoelectricidad fue el científico alemán Thomas Johann Seebeck a principios del siglo XIX, pero no fue hasta más de un siglo más tarde cuando se encontraron aplicaciones prácticas de ella. Seebeck descubrió que si los dos polos de un circuito eléctrico consistente en dos metales distintos soldados estaban a diferentes temperaturas, producían una desviación en una aguja magnética, como si se hubiese sometido a la acción de un imán, este efecto fue bautizado como efecto Seebeck. Sin embargo, el mismo Seebeck no supo dar una explicación correcta para aquel fenómeno, él insistió en que el material se magnetizaba cuando era sometido a una diferencia de temperaturas.

13 años después, el físico francés Jean Charles Athanase Peltier descubrió el efecto inverso, observó que al pasar una corriente por un circuito constituido por dos metales distintos soldados, aparecía un gradiente de temperaturas, el llamado efecto Peltier. Al igual que Seebeck, él también interpretó mal el resultado, Peltier asumió que esto era sucedido debido a la ya descubierta ley de Joule-Lenz, que enunciaba que al pasar un corriente eléctrico por un conductor, emitía calor.

Fue en 1838 Emily Lenz quién demostró que el efecto Peltier era independiente de la teoría Joule-Lenz, y además descubrió que la dirección del corriente condicionaba la naturaleza del sistema, entregar o quitar calor.

El tercer efecto involucrado en el campo de la termoelectricidad, es el efecto Thomson el cual fue descubierto por el físico británico William Thomson en 1851. Este efecto afirmaba que cuándo circula una corriente eléctrica por un cierto material sometido además a un gradiente de temperatura, se generaba o absorbía calor. Thomson también explicó la relación entre los efectos Seebeck y Peltier de una forma comprensible.

Estos descubrimientos dieron lugar a un completamente nuevo campo en la ingeniería.

3. APLICACIONES

Aunque popularmente poco conocidos, los dispositivos que emplean esta tecnología son cada vez más utilizados en sectores tecnológicamente avanzados como en el aeroespacial, medicina, láser entre otros. Aunque también se pueden encontrar en objetos domésticos simples como neveras portátiles.

Los más comunes son la refrigeración de sistemas electrónicos como láseres u otros elementos de alta precisión que deben estar a temperaturas constantes. Con estos dispositivos se obtiene un control de temperatura simple y fiable sin necesidad de complejos sistemas constituidos por bombas de calor o compresores.

Debido a su reversibilidad, una de las mejores virtudes de estos dispositivos, también pueden utilizarse en ciclos de recuperación de energía, por ejemplo, el departamento BMW EfficientDynamics ya ha realizado una serie de prototipos con elementos Peltier junto al tubo de escape a fin de alimentar los sistemas eléctricos del vehículo, ver figura 1.

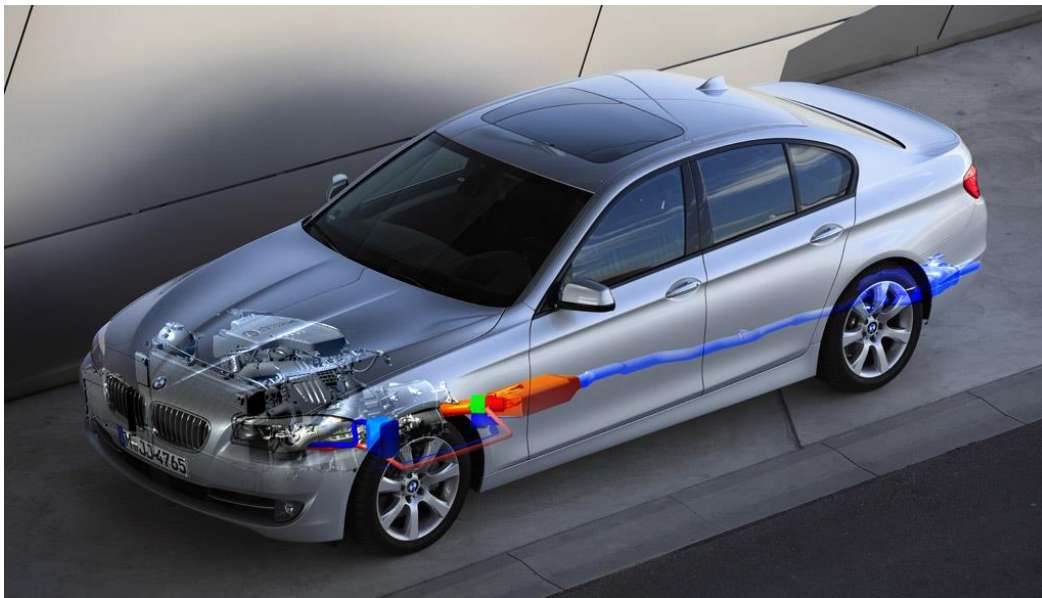


Figura 1. BMW Serie 5 con tecnología EfficientDynamics.

Fuente: www.motorauthority.com

Esto, junto con otros sistemas de recuperación como el llamado *Turbosteamer* (una turbina impulsada por la expansión de un gas debido al calor residual del sistema de escape), llega a ofrecer mejoras de un 10% en el rendimiento térmico del motor de un vehículo convencional.

Que empresas grandes como BMW hayan apostado por estos sistemas indica claramente lo que se verá en un futuro próximo en muchos de los bienes que se utilizan a diario en nuestra sociedad.

En resumen, las células Peltier nos permiten tanto aprovechar calor residual de otros procesos energéticos de una forma sencilla, como controlar termalmente la temperatura de otros sistemas u objetos con un simple, compacto y cada vez más asequible sistema sin tener que recurrir a complejos, caros y voluminosos sistemas.

Especialmente en esta época dónde la demanda energética crece junto con el precio de los recursos, y las pérdidas calóricas en los dispositivos tanto electrónicos como mecánicos son cada día más inadmisibles, las celdas Peltier sin duda alguna cobrarán una gran importancia por lo que al aprovechamiento de energía residual se refiere.

4. TEORIA

Previamente en este trabajo se ha hecho hincapié en la sencillez, uno de los factores clave de estos dispositivos, consecuentemente, la carga teórica que hay detrás de las placas Peltier no es muy copiosa, y con ciertos conocimientos básicos de termodinámica y electricidad que se explicarán a continuación, será de fácil comprensión.

A continuación se explican las leyes físicas anteriormente mencionadas que intervienen en su funcionamiento y todo el repertorio de fórmulas necesarias para poder caracterizarlos correctamente.

4.1 CONCEPTOS

Una vez mencionadas y explicadas todas las reglas físicas que rigen el funcionamiento de las celdas Peltier y antes de proceder con la explicación de su funcionamiento, es necesaria la familiarización con una serie de conceptos clave para la comprensión de estos dispositivos.

4.1.1 Semiconductores

Un semiconductor es un material con carácter aislante a bajas temperaturas, aunque posee propiedades conductoras a temperatura ambiente, con una conductividad eléctrica a medio camino entre un conductor y un aislante. Su conductividad puede variar con la adición de impurezas en su estructura molecular. Estas impurezas se consiguen dopando el material, esto significa la adición de electrones o de agujeros en su estructura dando lugar a dos tipos de semiconductores.

Tipo N: Son todos los semiconductores con electrones de más. Su nombre “N” proviene de “negativo” debido a su naturaleza negativa de carga eléctrica causada por el excedente de electrones.

Tipo P: Así son nombrados los semiconductores con agujeros de más. Su nombre “P” proviene de “positivo” debido a su naturaleza positiva de carga eléctrica causada por la carencia de electrones.

Los dopantes más empleados con los cuales se consiguen estos tipos de semiconductores, son el silicio (Si), el fósforo (P) y el arsénico (As) para el tipo N, mientras que el dopante del tipo P, es el boro (B) puesto que carece de un electrón en su banda de valencia.

4.1.2 Unión P-N

Estos dos tipos de semiconductores se unen para formar las llamadas uniones P-N (*n-p Junction en la fotografía*), en la unión, los electrones del semiconductor tipo N se desplazan hacia los agujeros del tipo P, dejando una zona de carga neutra, la llamada unión.

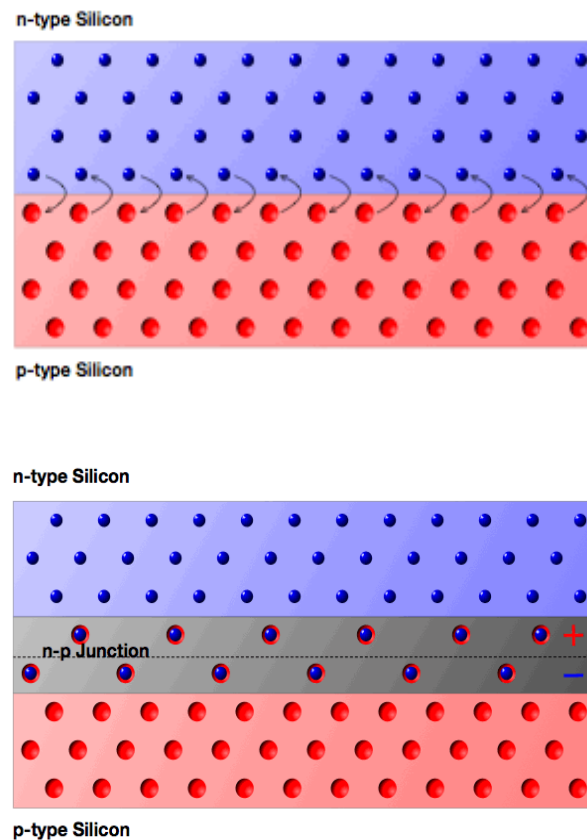


Figura 2. Unión PN.

Fuente: www.en.f-alpha.net

4.2 FENÓMENOS IMPLICADOS

Hay una serie de fenómenos físicos a tener en cuenta durante el estudio de las celdas Peltier, incluyendo los efectos Seebeck-Peltier y Thomson, pero también algunos más elementales como el efecto Joule y la ley de Ohm. Aunque no todos representan la misma importancia como se explicará a continuación.

4.2.1 Efecto Seebeck

El efecto Seebeck consiste en la conversión de una diferencia de temperaturas en electricidad en los termopares. La intensidad de esta corriente, dependerá tanto del material de los termopares, como de la diferencia de temperaturas a la cual están sometidos.

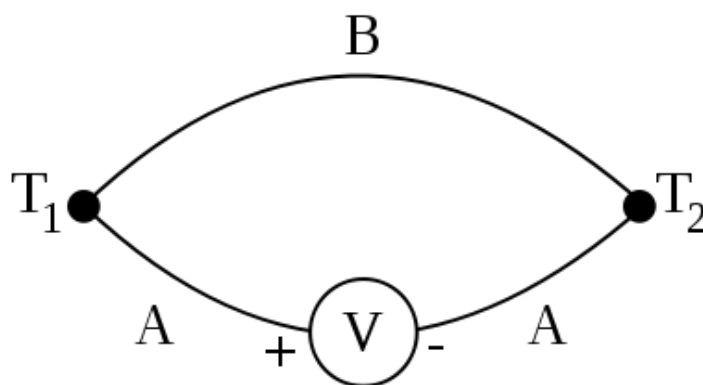


Figura 3. Esquema efecto Seebeck.

Fuente: <http://commons.wikimedia.org/>

La figura anterior es un esquema que muestra como este fenómeno trabaja. Dados dos materiales unidos formando un circuito como el de la figura, y con cada unión sometida a una distinta temperatura se genera una diferencia de potencial debido a la migración interna de electrones.

Para cada tipo de unión, hay un coeficiente de Seebeck que relaciona la diferencia de potencial generada con la diferencia de temperatura a la cuál esta unión ha sido sometida aunque continuamente se están descubriendo combinaciones cada vez más eficientes, estos valores suelen ser de microvoltios por cada grado kelvin de diferencia en los mejores casos.

La fórmula que explica este fenómeno, es la que viene a continuación.

$$V_{AB} = \alpha \cdot \Delta T$$

1

Siendo:

α = Coeficiente de Seebeck (V/K)

V_{AB} = Tensión eléctrica entre los polos A y B (V)

ΔT = Diferencia de temperaturas entre cara fría y cara caliente (K) o ($^{\circ}\text{C}$)

La tabla inferior muestra los valores de este coeficiente para algunas de las combinaciones más usadas. Los valores del coeficiente de Seebeck corresponden a la última columna expresados en microvoltios por grado centígrado.

Letra de Referencia	Materiales	Rango $^{\circ}\text{C}$	$\frac{\mu\text{V}}{^{\circ}\text{C}}$
B	Rodio/platino, platino 30%, rodio 6%	0 a 1800	3
E	Cromel/constantán	- 200 a 1000	63
J	Hierro/constantán	- 200 a 900	53
K	Cromel/alumel	- 200 a 1300	41
N	Nirosil/misil	- 200 a 1300	28
R	Platino/platino con 13% rodio	0 a 1400	6
S	Platino/platino con 10% rodio	0 a 1400	6
T	Platino/platino con 10% rodio	- 200 a 1000	43

Tabla 1. Coeficientes de Seebeck para diferentes uniones.

Fuente: <http://www.sites.upiicsa.ipn.mx/>

4.2.2 Efecto Peltier

Como se ha comentado al inicio de este documento, el efecto Peltier es exactamente el proceso inverso que describe el efecto Seebeck, es decir, al aplicar una diferencia de potencial en un termopar con los extremos unidos, se genera una diferencia de temperatura en las uniones, ver figura 4.

La expresión con la que demostró el efecto su descubridor describe la potencia generada o absorbida por el termopar en función del material y la intensidad que lo atraviesa.

$$\dot{Q} = \Pi_{AB} \cdot I \quad 2$$

El coeficiente Π_{AB} es la diferencia de coeficientes de los dos materiales de la unión $\Pi_A - \Pi_B$.

Siendo:

\dot{Q} = Potencia generado o absorbida por la celda Peltier (W)

Π_{AB} = Coeficiente de Peltier entre los dos materiales (V)

I = Intensidad de corriente (A)

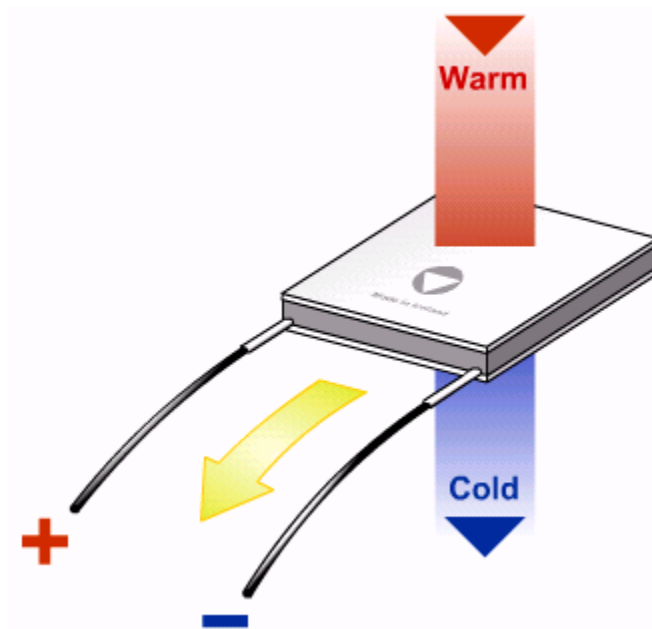


Figura 4. Funcionamiento de una celda Peltier.

Fuente: www.nergiza.com

4.2.3 Ley de Ohm y Potencia eléctrica

Como se ha mencionado previamente, las placas estudiadas suministran una fuente de corriente continua cuando están sometidas a una diferencia de temperaturas, y viceversa. Por lo que para estudiar la potencia que se puede extraer es necesario recorrer a ecuaciones de electrotecnia básica, y así poder comprender como se deducen ciertas ecuaciones involucradas en el proceso de obtención de energía.

La primera ecuación a tener en cuenta es la más conocida y la primera en aprender cuando se entra en el campo de la electricidad, la ley de Ohm, descubierta por el físico alemán Georg Ohm en 1827. Esta ley establece la directa proporcionalidad entre intensidad y voltaje, e indirecta proporcionalidad entre la intensidad y la resistencia de un material.

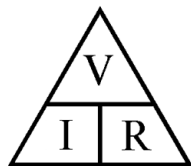


Figura 5. Triángulo de Ohm.

Fuente: www.electricidadyelectronicaindustrial.bligoo.com.mx

$$I = V/R_e \quad 3$$

La potencia suministrada por una fuente eléctrica depende de la cantidad de electrones que circulan en un tiempo determinada y del voltaje al cuál estos están sometidos, por lo que la ecuación será la siguiente.

$$P = V \cdot I \quad 4$$

Siendo:

$P =$ Potencia eléctrica (W)

$V =$ Voltaje (V)

$I =$ Intensidad de corriente (A)

$R_e =$ Resistencia eléctrica (Ω)

4.2.4 Efecto Thomson

A diferencia de los dos efectos anteriores, el efecto Thomson no se aplica directamente a termopares, sino a un solo material. Este fenómeno estudia el enfriamiento o calentamiento de un material expuesto a un gradiente de temperaturas entre sus 2 conexiones al pasar por él una corriente eléctrica. Según la dirección de la corriente eléctrica pasante, este generará o absorberá calor.

La ecuación deducida por el mismo William Thomson que describe este efecto enuncia que la potencia calorífica generada o absorbida, es el producto de la densidad de corriente por el gradiente de temperatura, multiplicada por el coeficiente de Thomson.

$$\dot{Q}t = \mu \cdot J \cdot \frac{dT}{dx} \quad 5$$

Siendo:

$\dot{Q}t$ = Potencia por unidad de volumen absorbida por el efecto Thomson (W/m³)

μ = Coeficiente de Thomson (W/A·K)

J = Densidad de corriente (A/m²)

$\frac{dT}{dx}$ = Gradiente de temperatura (K/m)

Una peculiaridad muy interesante de este coeficiente (μ), es que de entre los tres ya citados (Seebeck, Peltier y Thomson), este es el único directamente medible para cada material, sin necesidad de estar unido a otro formando un termopar.

4.2.5 Relaciones de Thomson

A partir de la ecuación de Seebeck anteriormente enunciada (1) y la ecuación de la potencia eléctrica (4), puede deducirse dos ecuaciones fundamentales en este proceso, las que nos define la entrada y la salida de calor debido al efecto Seebeck.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \Delta T \cdot I \quad 6$$

Reemplazando:

$$(\alpha \cdot \Delta T) \text{ por } V \text{ en la ecuación de Potencia eléctrica}$$

Esta ecuación 6 recientemente obtenida, es la que nos mostrará tanto el calor absorbido por la placa en la cara caliente (6a), como el perdido por la cara fría de la celda (6b).

$$\dot{Q}_h = \alpha \cdot T_H \cdot I \quad 6a$$

$$\dot{Q}_l = \alpha \cdot T_L \cdot I \quad 6b$$

Desarrollando:

$$\Delta T = T_H - T_L$$

Siendo:

$$T_H = \text{Temperatura en la cara caliente (K)}$$

$$T_L = \text{Temperatura en la cara fría (K)}$$

$$\dot{Q}_h = \text{Calor absorbido en la cara caliente debido al efecto Seebeck (W)}$$

$$\dot{Q}_l = \text{Calor cedido por la cara fría debido al efecto Seebeck (W)}$$

Se puede apreciar que la recientemente mencionada ecuación 6 y la ecuación de Peltier (2), muestran un cierto parecido, pues las dos describen la potencia que genera o absorbe la célula Peltier en función de la intensidad.

$$\Pi = \alpha \cdot T \quad 7$$

Igualando:

$$(\Pi_{AB} \cdot I) \text{ con } (\alpha \cdot \Delta T \cdot I)$$

Siendo:

$$\Pi_{AB} = \Pi_B - \Pi_A$$

$$\Delta T = T_H - T_L$$

De este modo se ha podido obtener la relación entre los coeficientes de Seebeck y Peltier de los materiales. El coeficiente de Thomson también puede expresarse en función de estos dos, debido a que los 3 fenómenos están fuertemente relacionados. Esta fue la ecuación dada por el físico británico:

$$\mu = T \cdot d\alpha/dT \quad 8$$

Siendo:

$$T = \text{Temperatura absoluta (K)}$$

4.2.6 Efecto Joule

Cuando por un conductor circulan electrones, la estructura atómica del material se ve excitada por los choques de estos, causando un efecto irreversible de generación de calor a costa de pérdida de energía cinética de los electrones. Sin duda alguna, este fenómeno es de vital importancia en el estudio de sistemas electrónicos, pues sin una correcta refrigeración, nuestros instrumentos podrían verse dañados gravemente.

La ecuación que desarrolló el físico británico James Prescott Joule, define el calor generado en función del voltaje al cual el material estaba sometido y la intensidad que lo atravesaba.

$$\dot{Q}_j = V \cdot I \quad 9$$

Junto con la ecuación de la ley de Ohm (3), se puede obtener una fórmula que relacione las pérdidas por el efecto Joule con la resistencia eléctrica y la intensidad.

$$\dot{Q}_j = P \cdot R_e \quad 10$$

Reemplazando:

$$(I \cdot R_e) \text{ por } V \text{ en la ecuación de Joule}$$

Siendo:

$$\dot{Q}_j = \text{Calor generado por efecto Joule (W)}$$

4.2.7 Conducción de calor y Ley de Fourier

Un factor muy importante de cara a la eficiencia de una celda Peltier, es la conductividad térmica entre las caras fría y caliente del elemento. La conducción de calor es una propiedad de los materiales que sucede cuando dos cuerpos a distintas temperaturas están en contacto directo, fluyendo el calor desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor.

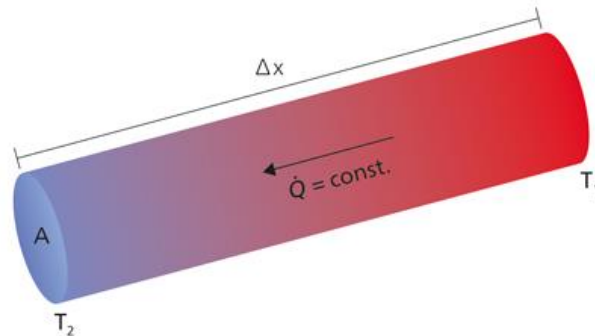


Figura 6. Esquema explicativo de la conductividad térmica.

Fuente: www.netzsch-thermal-analysis.com/

Esta propiedad puede ser expresada por la ley de Fourier que describe el flujo de calor entre los dos extremos en función de la diferencia de temperaturas (ΔT) y la resistencia térmica (K) entre estas dos.

$$\dot{Q}_c = -K \cdot \nabla T \quad 11$$

Siendo:

\dot{Q}_c = Flujo de calor conducido (W)

K = Resistencia térmica (K/mW)

∇T = Gradiente de temperatura $\Delta T/\Delta x$ (K/m)

4.3 FUNCIONAMIENTO

Una celda Peltier está compuesta por distintos semiconductores de tipos N y P dispuestos alternadamente y conectados en serie a lo largo del elemento mediante soldaduras que están en contacto con la cara fría (NP) y la cara caliente (PN), aislados entre sí mediante un material cerámico para garantizar que el flujo eléctrico haga el recorrido deseado.

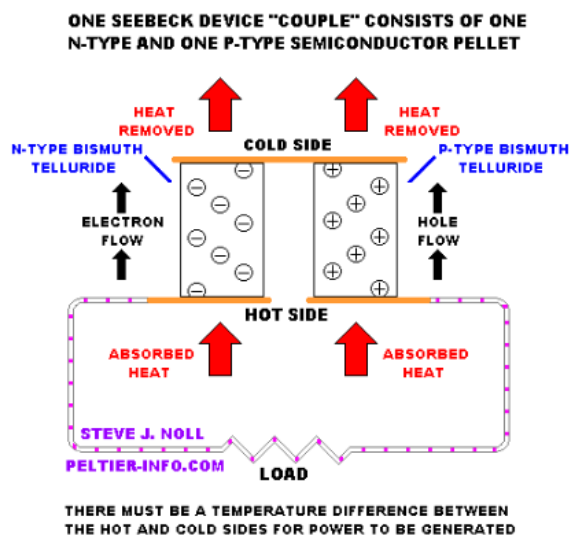


Figura 7. Esquema de la corriente generada al aplicar un gradiente de calor en un termopar tipo PN.

Fuente: www.peltier-info.com

Debido a la diferencia de temperaturas entre la cara fría y caliente de la placa, la estructura molecular del material cambia, provocando una migración de huecos (*Hole flow*) hacia el lado frío de los componentes tipo P, cargándolos positivamente, esto produce una migración de electrones en los elementos tipo N tal y como se observa en la figura 7, a fin de estabilizar la carga, y consecuentemente se crea un corriente eléctrico, esto pasa en cada unión para toda la celda, esta intensidad creada, es continua, pues los electrones siempre siguen la misma dirección, siempre y cuando no se inviertan los lados frío y caliente.

Cuando se aplica un potencial, el efecto es el mismo pero inverso, primero sucediendo el movimiento de electrones y después el de huecos cambiando la estructura del material que conlleva el descenso de temperatura en las soldaduras.

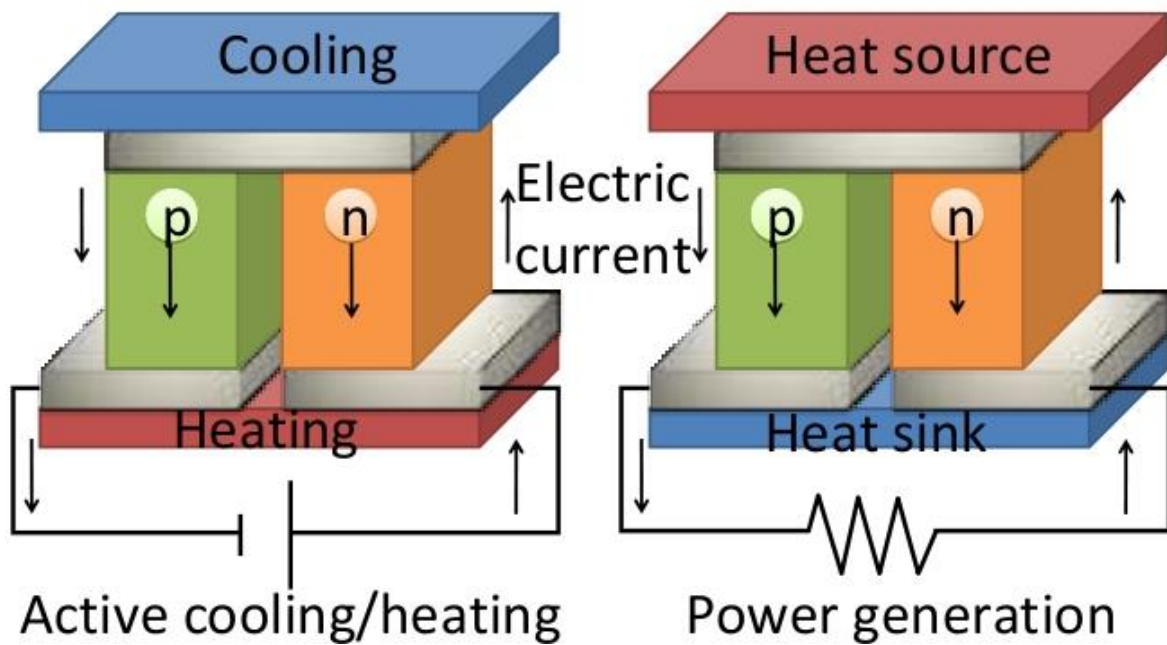


Figura 8. Funcionalidad dual de las celdas Peltier.

Fuente: gibbs.uio.no

Otra propiedad interesante de estas células, es que se puede invertir la polaridad del voltaje si intercambiamos las caras fría y caliente invirtiendo así, el sentido con el cual se desplazan los electrones, como muestra la figura 8.

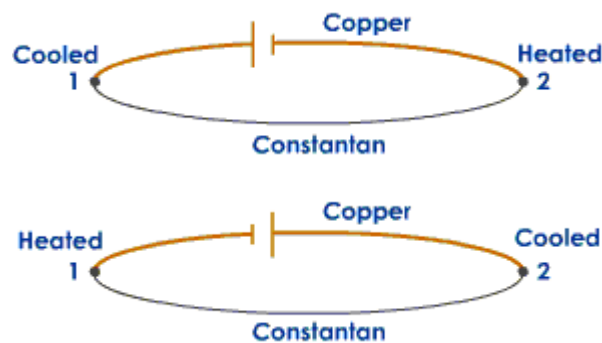


Figura 9. Cambio polaridad celda Peltier

Fuente: www.tutorvista.com

La figura siguiente muestra la estructura de una celda Peltier, no a nivel teórico, sino a nivel geométrico, se puede observar la distribución de los semiconductores N y P, y que las soldaduras siempre siguen la misma dirección, opuesta en cada lado del dispositivo.

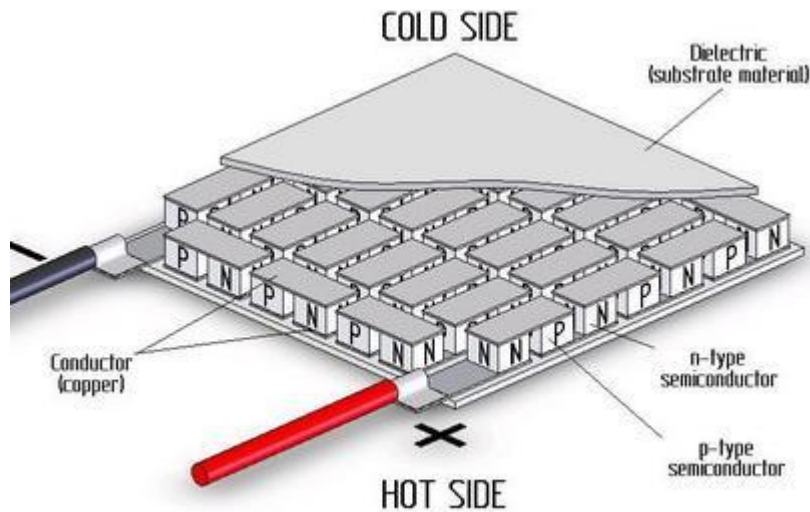


Figura 10. Vista interior de una celda Peltier.

Fuente: www.kryothermtec.com

Este dibujo es una representación esquemática para poder observar la distribución de todas las uniones P-N, las celdas Peltier comerciales como la estudiada en este proyecto suelen tener alrededor de 130 uniones.

4.4 BALANCE ENERGÉTICO

4.4.1 Balance de energías en la celda

A partir de las ecuaciones anteriores se puede empezar a estudiar el comportamiento de las celdas, y deducir todos sus parámetros teóricos. Para ello es necesario realizar un balance de energías, ver ejemplo 11, una forma muy clara y sencilla de entender la importancia de cada fenómeno implicado.

El flujo de calor por unidad de tiempo que entra a la célula Peltier por la cara caliente \dot{Q}_H , es el único *input* del volumen de control que estudiaremos, y este es la suma del flujo de calor proveniente de las resistencias debido a la conducción térmica ya que están en contacto, y por otro lado el flujo de calor debido al efecto Peltier, esta segunda ecuación ha sido simplificada como se ha comentado anteriormente.

$$\dot{Q}_H = \underbrace{\dot{Q}_C}_{\text{Flujo de calor asociado a la conducción térmica}} + \underbrace{\alpha \cdot T_H \cdot I}_{\text{Flujo de calor asociado a la celda Peltier}} \quad 12a$$

De la misma manera, el flujo de calor que sale por la cara fría de la celda viene dado por la ecuación, aquí se tiene en cuenta los mismos fenómenos que en la ecuación anterior, pero con los parámetros correspondientes de la cara fría, véase que en este segundo caso, los signos son negativos, pues la energía se escapa por la cara fría.

$$\dot{Q}_L = -\dot{Q}_C - \alpha \cdot T_L \cdot I \quad 12b$$

Las pérdidas de calor debido al efecto Joule se calcularán acorde con la ecuación anteriormente mencionada de Joule (apartado 4.2.6), una mitad de las cuales se perderán por la cara fría y la otra por la cara caliente. Véase, que en este caso la resistencia eléctrica introducida en la fórmula es R_0 , que como se mostrará más adelante, corresponde a la resistencia eléctrica interna de la celda.

Al tratarse de pérdidas, \dot{Q}_J también posee un signo negativo pues como se ve en la figura que viene a continuación, esta potencia sale del volumen de control a diferencia de \dot{Q}_H .

Tal y como se ve en la figura, el balance de energía podrá expresarse de la siguiente manera:

$$P_{out} = \dot{Q}_H + \dot{Q}_L + \dot{Q}_J \quad 13$$

A partir de la integración de las fórmulas mencionadas en este subapartado, obtendremos:

$$P_{out} = \alpha \cdot I (T_H - T_L) - R_0 \cdot I^2 \quad 14$$

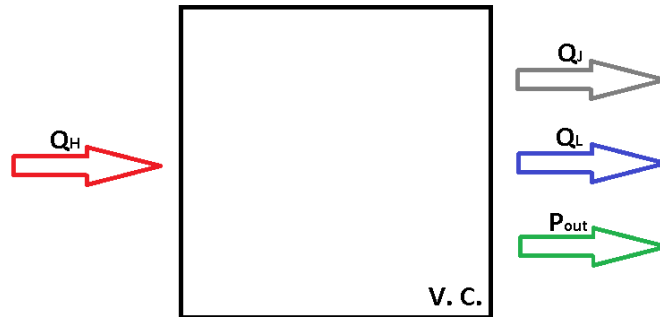


Figura 11. Balance energético sobre el volumen de control correspondiente a la placa Peltier

Finalmente se ha obtenido una función que describe la potencia obtenida de la célula Peltier a partir de parámetros fácilmente evaluables y controlables, aunque el factor α y la resistencia eléctrica de la celda y la corriente que pasa por ella presentan variaciones en función de la temperatura a la cual están sometidos, como se verá más adelante.

Pero lo más importante de este apartado, es que este solo dibujo, representa todo el balance energético que ocurre en el proceso estudiado de una forma muy comprensible.

4.4.2 Pérdidas energéticas en el recipiente

A fin de poder estudiar la eficiencia que ofrece el dispositivo Peltier, se tiene que tener en cuenta un factor significativamente relevante, las pérdidas energéticas desde que la potencia es suministrada a la fuente, hasta que esta llega a la cara caliente de la celda Peltier.

Por lo tanto, se deberá realizar un breve estudio de conducción térmica a través del recipiente donde se hallan tanto las resistencias como la cara caliente de la celda Peltier.

Para ello se aplicará la anteriormente explicada ley de Fourier (ecuación 11).

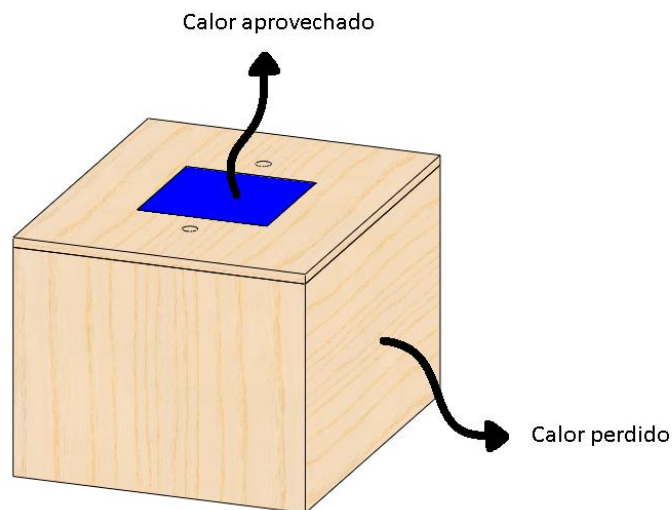


Figura 12. Esquema de pérdidas de calor en el recipiente.

En este caso, el valor de la energía térmica perdida será igual a:

$$\dot{Q}_c = K \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot A \quad 15$$

Siendo:

Δx = Espesor de la pared (m)

A = Área de la pared (m)

K = Conductividad térmica del material (W/mK)

Esta ecuación define la transferencia de calor a través de un área con un cierto espesor, por lo que, se tendrá que calcular las pérdidas para cada una de las paredes, descontando el área de la celda Peltier en la cara superior.

- La tapa superior tiene una superficie de 90x70 mm, pero tiene que ser descontada una de 40x40mm de la celda Peltier.
- Dos de las cuatro paredes laterales tienen una superficie de 60x90 mm y las otras dos de 60x70 mm.
- La base tiene una superficie de 90x70 mm.
- El espesor de las paredes laterales es de 10 mm y el de las tapas superior e inferior de 3 mm.
- Se escoge un valor de conductividad térmica de la madera utilizada de 0.04 W/mK, un valor bajo incluso para una madera debido a que se trata de un conglomerado.

Las pérdidas de calor teóricas en función de la temperatura serán las siguientes.

$$\dot{Q}_c = K \cdot \left[\frac{(0.09 \cdot 0.07 \cdot 2 - 0.04 \cdot 0.04)}{0.003} + \frac{(0.06 \cdot 0.07 \cdot 2 + 0.06 \cdot 0.09 \cdot 2)}{0.01} \right] \cdot \Delta T \text{ [W]}$$

$$\dot{Q}_c = 0.2234 \cdot \Delta T \text{ [W]}$$

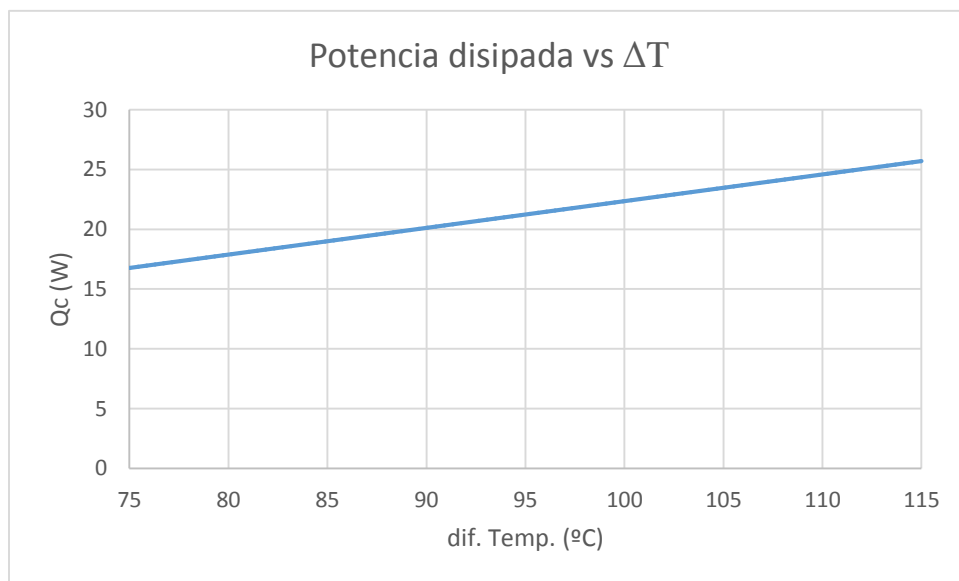


Figura 13. Potencia perdida a través del recipiente hermético.

La ecuación de Fourier muestra unas pérdidas energéticas del dispositivo utilizado durante la caracterización de la celda Peltier linealmente dependientes de la diferencia de temperaturas entre la cara fría y caliente de la celda. Esto es debido a que la ecuación utilizada se compone de una parte que depende únicamente de la geometría del cuerpo, que no varía durante el transcurso de la toma de datos, y otra parte que depende de la diferencia de temperatura.

Este cálculo indica unas pérdidas de entre 17W y 26W teóricamente durante la realización de los ensayos, teniendo en cuenta que la fuente proporciona un máximo de 70W, son valores que hay que tener en cuenta durante la realización del cálculo de la eficiencia de la celda.

4.5 CONCEPTOS DEL MODELO ELÉCTRICO

Estudiar el comportamiento eléctrico de la celda Peltier puede ser una tarea complicada y laboriosa, puesto que cada termopar interno actúa como un generador de tensión y a la vez ofrece una resistencia a la circulación de los electrones.

El modelo de la célula Peltier como una fuente de tensión, se puede simplificar y de esta forma estudiar, utilizando el teorema de Thévenin un método muy utilizado en electrónica a fin de simplificar complejos sistemas.

4.5.1 Teorema de Thévenin

En 1853 Hermann von Helmholtz descubrió este teorema aunque no fue hasta 30 años más tarde Léon Charles Thévenin quién lo redescubrió y posteriormente bautizó con su nombre. Este teorema enuncia que cualquier combinación de fuentes de corriente y resistencias con dos terminales A y B es eléctricamente equivalente a un circuito únicamente compuesto por una resistencia y una fuente de tensión.

Para poder calcularse el voltaje de Thévenin (V_{th}) en un punto del circuito, debe eliminarse la resistencia donde se quiere saber este potencial dejando los dos extremos libres, el voltaje que se produce en el circuito resultante una vez eliminada la carga entre estos dos polos, será la tensión de Thévenin.

A fin de hallar la resistencia de Thévenin (R_{th}) en cambio, primero se debe calcular la intensidad que pasa por la carga estudiada en caso que no hubiera carga alguna, una vez encontrada la intensidad, esta debe dividirse a la V_{th} antes encontrada y el resultado es la R_{th} .

De este modo se puede obtener el circuito de la imagen que viene a continuación y trabajar con este circuito en lugar del esquema real que presenta este dispositivo.

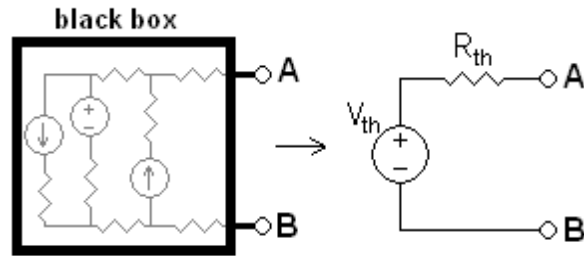


Figura 14. Teorema de thévenin.

Fuente: www.wikipedia.org

R_{th} = Resistencia eléctrica equivalente del módulo TE (Ω)

V_{th} = Tensión en circuito abierto del módulo TE (V)

En este trabajo, esta serie de cálculos no se realizarán pues no se tiene los valores de tensión y resistencia internos en dicha célula. Lo que se hará, será estudiar directamente la celda Peltier como si sólo se tratara de una fuente de tensión conectada en serie a una resistencia interna, pues como el teorema de Thévenin mostrado indica, será equivalente al circuito real.

4.5.2 Parámetros a evaluar

Para poder estudiar la celda de una forma fiable y en un amplio rango de sollicitaciones de carga, se ha conectado en el circuito un potenciómetro de 5W y 10Ω para poder controlar la carga R_L (variando la resistencia ofrecida de este).

De modo, que partiendo del esquema de la celda Peltier obtenido usando el teorema de Thévenin, el circuito estudiado presenta la siguiente configuración, siendo A y B los dos extremos de los cables salientes de la célula Peltier.

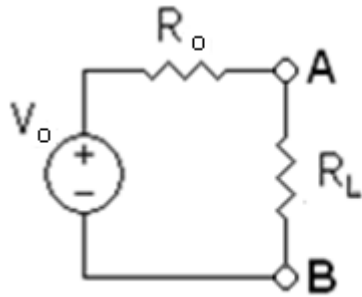


Figura 15. Circuito equivalente de la célula Peltier con la carga estudiada

Siendo:

R_L = Resistencia ofrecida por el potenciómetro (Ω)

R_0 = Resistencia ofrecida por la celda (Ω)

$V_{AB} = V_L$ = Tensión en la carga R_L (V)

V_0 = Tensión total del circuito (V)

Contemplando:

A partir de ahora, el voltaje de la carga R_L se llamará V_L y no V_{AB} para evitar confusiones con el V_{AB} del apartado anterior.

Al estar el potenciómetro conectado en serie con el dispositivo, el cálculo para hallar la potencia que la celda suministra a la carga, es sumamente sencillo una vez se han observado los valores de voltaje entre los dos polos de la carga y de la intensidad de corriente que la cruza a partir de la ecuación de la potencia eléctrica.

De la figura anterior, y aplicando electrotecnia básica, podemos hallar el valor de la tensión del circuito, la que suministra la celda sin tener en cuenta la resistencia eléctrica interna de esta. El primer producto de la ecuación corresponde a la carga perdida en la resistencia interna, mientras que el segundo término corresponde la caída de tensión en R_L .

$$V_0 = I \cdot R_0 + V_L \quad (17) \quad 16$$

Y de este sistema podremos deducir su potencia extraída mediante las ecuaciones 16, 17 y 18, que resultan en la ecuación 19.

$$P_{Out} = I \cdot V_L \quad 17$$

$$P_{Out} = I^2 \cdot R_L \quad 18$$

$$P_{Out} = (V_0 - I \cdot R_0) \cdot I \quad 19$$

Reemplazando:

($V_0 - I \cdot R_0$) de la ecuación 16 en la ecuación 17 para obtener la ecuación 19

Siendo:

P_{Out} = Potencia de la carga R_L (W)

I = Intensidad del circuito (A)

R_0 = Resistencia interna de la celda Peltier (Ω)

Un parámetro muy importante en este trabajo, será la tensión en vacío (sin ninguna carga conectada a la salida de la celda Peltier), puesto que este va íntimamente relacionado con la eficiencia de la celda a la hora de generar energía. Para calcular la tensión en vacío, simplemente se retirará la carga R_L , dejando el circuito como muestra la figura de abajo.

Al estar el circuito abierto, no circula ninguna intensidad, y la pérdida de potencial en R_0 será 0 tal y como prevé la ecuación de Ohm, puesto que no circula corriente ($I = 0$).

Consecuentemente, V_0 será igual a V_L , esto supone que solo en este caso, será posible medir directamente el voltaje suministrado por la placa antes de la caída de potencial debido a la resistencia interna.

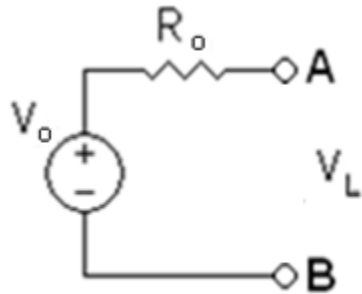


Figura 16. Circuito equivalente de la célula peltier sin carga

A partir de la ecuación 1 mencionada al inicio de este apartado, se puede obtener la siguiente con la que calcularemos el valor del coeficiente de Seebeck o alpha para cada diferencia de temperaturas, pues como se ha comentado en el apartado anterior, este afecta significativamente el valor del coeficiente de Seebeck.

$$\frac{V_0}{T_H - T_L} = \alpha \quad 20$$

Puesto que alpha depende de V_0 , esta solo podrá hallarse cuando el circuito esté abierto. Esta ecuación nos permitirá cuantificar el parámetro más significativo de la placa para cada diferencia de temperaturas.

Con las ecuaciones anteriores 19 y 20, se puede deducir otra ecuación relevante en este trabajo:

$$P_{Out} = \alpha \cdot I \cdot (T_H - T_L) - I^2 \cdot R_0 \quad 21$$

Reemplazando:

$$(\alpha \cdot (T_H - T_L)) \text{ por } V_0 \text{ en la ecuación 19.}$$

Hasta ahora, muchas de la ecuaciones sin embargo, dependen de un parámetro no medible con los dispositivos disponibles durante la realización de las tomas de datos, se trata de R_0 , la resistencia interna de la placa, por lo que esta debe expresarse en función de otros parámetros disponibles, con las ecuaciones 18 y 21 se puede deducir la siguiente expresión.

$$R_0 = \frac{\alpha}{I} \cdot (T_H - T_L) - R_L \quad 22$$

Reemplazando:

$$(\alpha \cdot I \cdot (T_H - T_L) - I^2 \cdot R_0) \text{ por } P_{out} \text{ en la ecuación 18.}$$

Como se experimentará a lo largo de este proyecto, la potencia de salida del sistema está relacionada directamente con la resistencia de la carga, así pues, jugando con esta se puede incrementar la potencia suministrada significativamente.

Para demostrarlo se puede partir de derivar la ecuación de la potencia de salida e igualarla a 0 con el fin de encontrar el máximo absoluto de la ecuación, consecuentemente, la I óptima.

$$\frac{dP_{out}}{dI} = 0$$

Derivando la ecuación 21 respecto de “ I ” se obtiene:

$$\frac{dP_{out}}{dI} = \alpha (T_H - T_L) - 2 \cdot R_0 \cdot I$$

Entonces, esta ecuación debe igualarse a cero a fin de hallar el punto de pendiente “0”, es decir, el máximo de la ecuación.

$$0 = \alpha (T_H - T_L) - 2 \cdot R_0 \cdot I$$

$$I_{PMAX} = \alpha (T_H - T_L) / 2 \cdot R_0 \quad 23$$

El valor de “ I ” que satisface esta igualdad, será el correspondiente a la intensidad que supone la potencia máxima del sistema. Sustituyéndola dentro de la ecuación 21, se obtendrá la “ P_{max} ”.

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 (T_H - T_L)^2}{2R_0} - \frac{\alpha^2 (T_H - T_L)^2}{4R_0}$$

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 (T_H - T_L)^2}{4R_o}$$

24

Como ya se ha comentado, “ R_o ” es un parámetro que no puede calcularse directamente, ni tampoco puede variarse de forma voluntaria, por lo que es más sensato dejar la ecuación anterior en función de “ R_L ”, que es la resistencia del potenciómetro, la que se ha podido medir y modificar durante todo el transcurso del experimento, con la ecuación 22 se puede deducir la Resistencia interna a partir de la Resistencia variable.

Toda la serie de ecuaciones deducidas y mencionadas hasta este punto, no ha sido solo para demostrar el funcionamiento de la placa desde un punto de vista teórico. Con estas expresiones se podrá calcular todos los parámetros deseados a partir de los valores obtenidos de diferencia de temperaturas, voltaje en la carga e intensidad que recorre el circuito.

Para acabar con este apartado, se estudiará también la potencia que se obtendrá en la carga, pues al fin y al cabo es la que realmente se puede usar a partir de la generada por la celda, en función de la diferencia de temperaturas entre las dos caras de la celda, y la Resistencia que opone la carga.

Se sabe que en todo circuito en serie, la potencia total del circuito (la que suministra la Fuente) es igual a la suma de todas las potencias que absorbe cada una de las cargas.

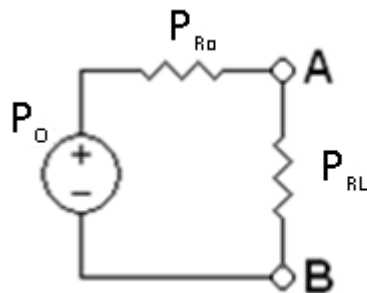


Figura 17. Circuito explicativo de las diferentes potencias en el circuito.

$$P_o = P_{Ro} + P_{RL}$$

25

A partir de las ecuaciones $P=I^2 \cdot R$ y $I=V/R$, se podrá deducir una tercera ecuación para obtener la potencia de la carga en función de ΔT , α , R_L y R_0 .

$$P_0 = \alpha^2 \cdot (T_H - T_L)^2 / (R_L + R_0) \quad 26$$

$$I = \alpha \cdot (T_H - T_L) / (R_L + R_0) \quad 27$$

A partir de las ecuaciones anteriores 25 y 26, puede deducirse una ecuación de gran importancia en este Proyecto, la que define la potencia total que se puede extraer del circuito en la carga que se conecte, es decir, toda la potencia que se puede aprovechar.

$$P_{RL} = \alpha^2 \cdot (T_H - T_L)^2 / (R_L + R_0) - [\alpha \cdot (T_H - T_L) / (R_L + R_0)]^2 \cdot R_0 \quad 28$$

5. CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE LA CELDA PELTIER

Para empezar el trabajo experimental el primer paso ha sido llevar a cabo toda la instalación del sistema a fin de poder controlar y evaluar las entradas y las salidas de este. Para disponer de los datos más fiables posibles, la celda Peltier se ha introducido dentro de un sistema hermético con una pérdida de calor mínima, solamente conectada con el exterior mediante un radiador, y se ha seguido un procedimiento para obtener los resultados más veraces posibles.

5.1 COMPONENTES

Para llevar a cabo este proyecto será preciso disponer de componentes muy específicos, algunos pueden encontrarse fácilmente en tiendas especializadas, otros deberán fabricarse a medida.

5.1.1 Componentes auxiliares

A parte de la celda, y todos los dispositivos eléctricos para medir los parámetros deseados, hará falta una estructura para facilitar la disposición de los elementos y garantizar una buena refrigeración para la parte fría de la celda, así como un gran aprovechamiento de la energía entregada, estos serán los nombrados componentes auxiliares, no aparecen en los esquemas eléctricos, pero son vitales para la veracidad de los resultados obtenidos.

A. Ventilador: Se trata de un Ventilador 80x80x25 mm de 24V que permite el buen funcionamiento del prototipo refrigerando la celda mediante convección forzada, de este modo se consigue que la cara fría de esta esté a una temperatura lo más próxima posible de la ambiente, provocando una diferencia de temperaturas entre las dos caras de la placa lo más amplia posible.



Figura 18. Ventilador de PC de 24V.

B. Radiador de aluminio: El radiador de aluminio o disipador de calor, va unido por contacto físico con la cara fría de la célula Peltier. Su función será la de refrigerar el dispositivo gracias a su gran superficie útil para este propósito y también a la alta conductividad térmica del material.

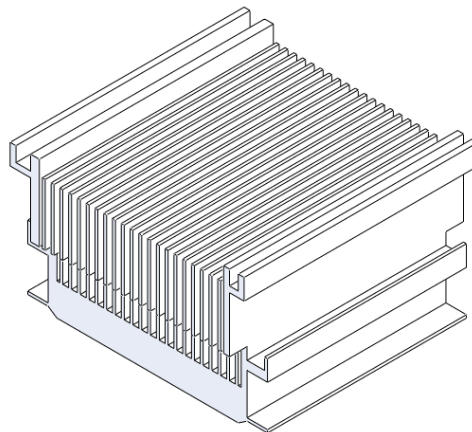


Figura 19. Radiador de aluminio

C. Conector térmico de aluminio: Conecta térmicamente las resistencias con el lado caliente de la celda debido a su buena conductividad térmica, una gran parte del calor generado por las resistencias es conducido hasta la placa Peltier. Esta pieza es mecanizada.

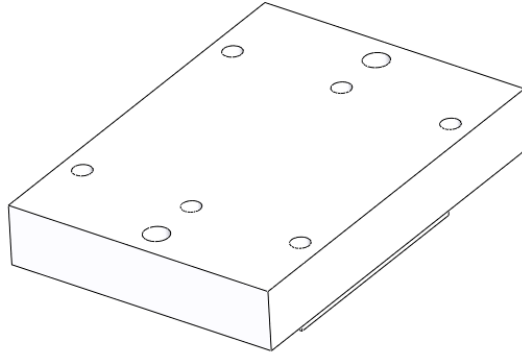


Figura 20. Conector térmico Resistencias-Celda

D. Recipiente hermético: Este se ha creado a partir de madera (chapa para las tapas y conglomerado para las paredes). Su finalidad es aislar del exterior las resistencias y la cara caliente de la celda Peltier, a fin de controlar toda la potencia que se entrega a esta y así calcular su eficiencia.

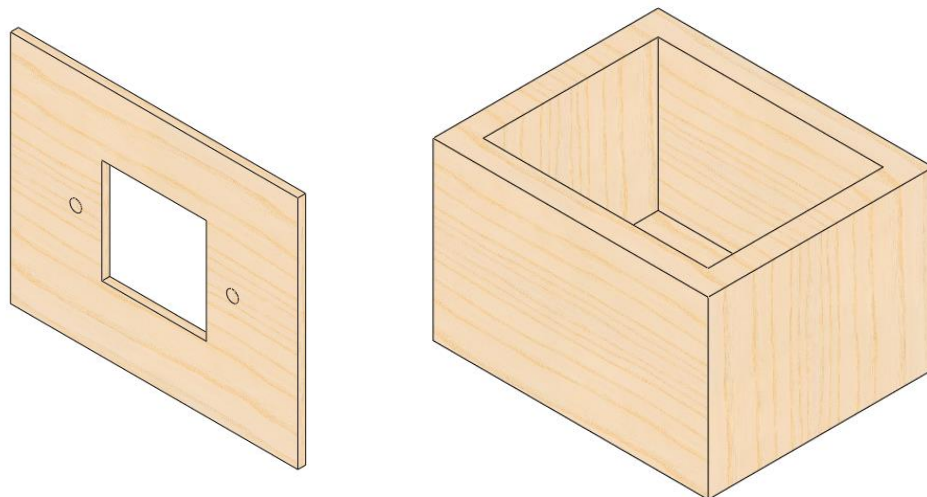


Figura 21. Recipiente de madera hermético. A la izquierda se vé la tapa superior, y a la derecha las paredes laterales y la tapa inferior.

5.1.2 Elementos del circuito eléctrico primario

Este modelo está dotado de dos circuitos eléctricos distintos, el primario, que es el encargado de suministrar energía a las resistencias del dispositivo a fin de incrementar la temperatura en la cara caliente de la célula Peltier, y el secundario, que será el que nos permitirá evaluar el comportamiento de la placa.

1. Generador de potencia: Con este generador alimentamos las resistencias con un máximo de 70W, este dispositivo no es comercial.



Figura 22. Generador de potencia

2. Resistencias (x2): Son las encargadas de proporcionar la temperatura caliente a la cara caliente de la celda, se tratan de dos resistencias de 18 Ω tipo HS.



Figura 23. Resistencia HS50 18R

5.1.3 Elementos del circuito eléctrico secundario

Este circuito es el que tiene como fuente de energía la celda Peltier, en este esquema se utilizarán todos los elementos de medición necesarios para obtener los valores que caracterizarán la celda.

A. Celda Peltier: La celda utilizada para la realización del trabajo ha sido una DT12-6 de la marca “marlow industries inc”. Se puede consultar todas sus especificaciones al Anexo. Esta es la placa a partir de la cual se generará una corriente eléctrica una vez sometida a una diferencia de temperaturas apreciable.



Figura 24. Celda Peltier DT12-6 de Marlow Industries Inc.

B. Potenciómetro: Para poder modificar la resistencia del circuito al cual está conectado la celda Peltier, se ha usado un potenciómetro bobinado 5W 10R de 10 ohm de resistencia máxima, la resistencia que este componente ofrece puede variarse a lo largo de todo el experimento a fin de conseguir una curva de potencia generada por la celda en función de la resistencia de carga que se haya seleccionado en cada instante.



Figura 25. Potenciometro 5W 10R

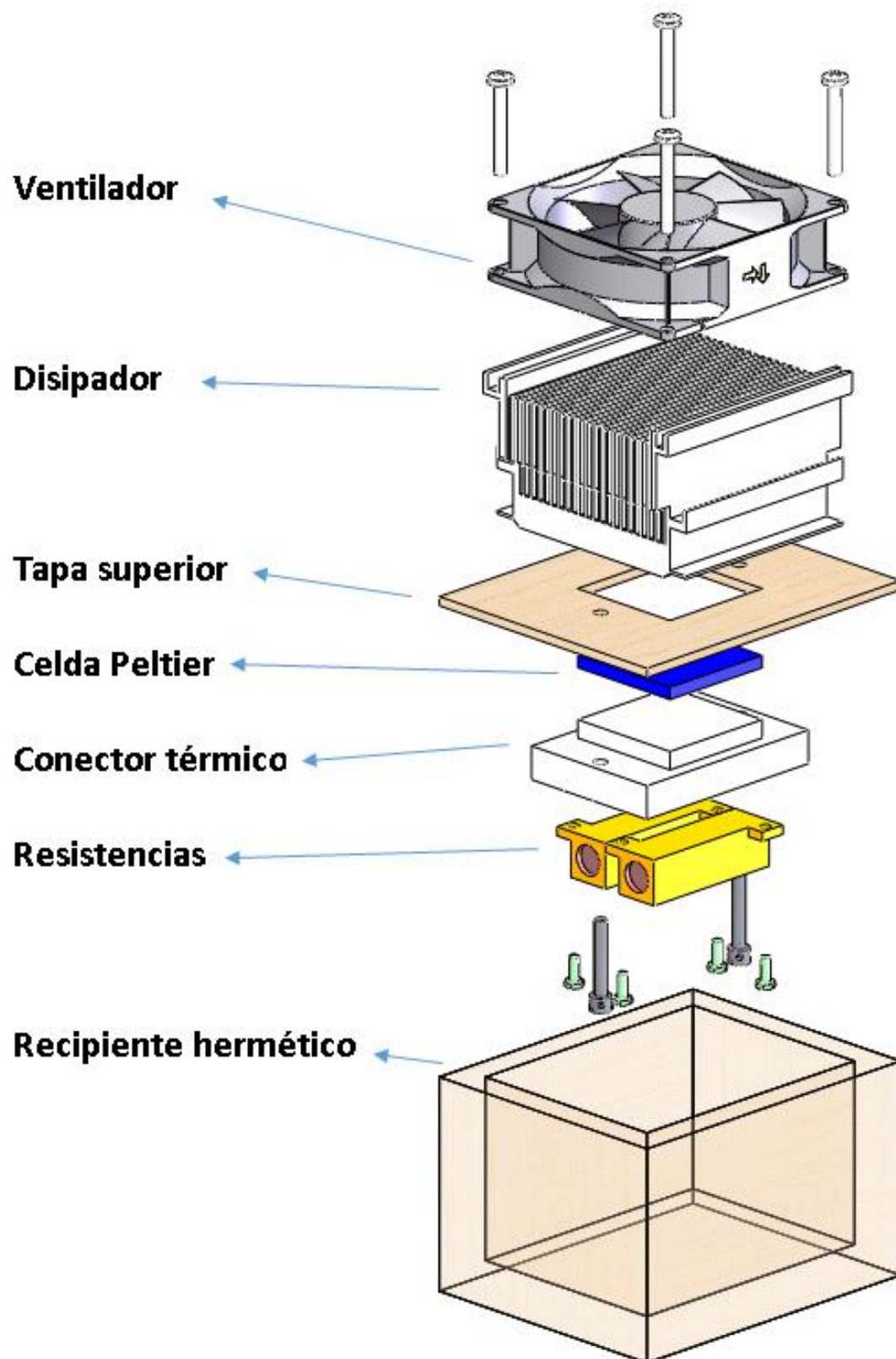


Figura 26. Modelo 3D del Ensamblaje de la celda Peltier con el ventilador, disipador de calor, las resistencias y el recipiente hermético

La figura 23 se trata de una vista explosionada del dispositivo creado para la realización del proyecto. En ella se pueden contemplar todos los componentes que lo integran, sin tener en cuenta los instrumentos de medición, la fuente de tensión, el potenciómetro y los cables utilizados para realizar todo el conexionado eléctrico.

5.1.4 Instrumentos de medición

A. Medidor de temperatura: este dispositivo será el encargado de mostrar en tiempo real la temperatura en la cara fría y paralelamente en la cara caliente de la celda Peltier. Pudiendo mostrar directamente la diferencia entre las dos si se desea, pues es el valor que realmente se necesita. Para su correcto funcionamiento, deberán conectarse dos sondas de temperatura a este artefacto, una corresponderá a T1, y la otra a la lectura T2.



Figura 27. Termometro digital Standard ST 9612

B. Multímetro: Usado como voltímetro para saber el voltaje en la carga, este se conecta en paralelo con el potenciómetro durante el proceso de medición, el utilizado para este propósito ha sido el modelo MAS830 de la marca KAISE.



Figura 28. Multímetro KAISE MAS830

C. Multímetro: Usado como amperímetro para saber la intensidad que pasa por la carga, este se conecta en serie entre la carga y la salida de la celda Peltier, por lo que la intensidad que lo atraviesa será la misma intensidad de todo el circuito.



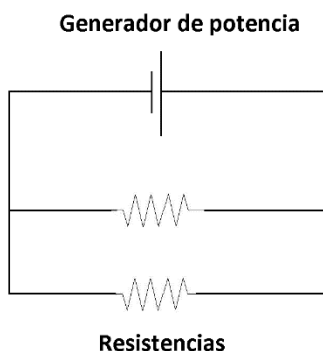
Figura 29. Multímetro MR 7182

5.2 INSTALACIÓN

Este sistema es integrado por los anteriormente mencionados componentes. Su funcionamiento paso a paso es el siguiente.

5.2.1 Circuito eléctrico primario

Con el generador de potencia, se alimenta las 2 resistencias, que generan calor y ascienden la temperatura de todo el recipiente de madera. Prácticamente todo este calor solo es disipado a través del conector térmico unido a la Peltier que está unida al disipador de aluminio. Las resistencias, tal como muestra la figura que viene a continuación, van conectadas en paralelo con el generador, debido a que la fuente no puede proporcionar más de 20V.



*Figura 30. Esquema eléctrico del circuito primario
cuya fuente de energía es el generador*

Es importante para evaluar la eficiencia de la celda, que la potencia suministrada a las baterías esté controlada, y que el calor que generen, no se pierda.

5.2.2 Control de la temperatura

A fin de poder controlar a tiempo real la diferencia de temperaturas entre cara fría y caliente, es necesario conectar dos sondas térmicas con el termómetro digital.

La sonda T2 del medidor de temperatura se introduce en el orificio realizado en el disipador, que está lo más cerca posible de la cara fría de la celda, y la sonda T1, se introduce dentro del conector térmico, quedando está muy cercana a la cara caliente de la celda.

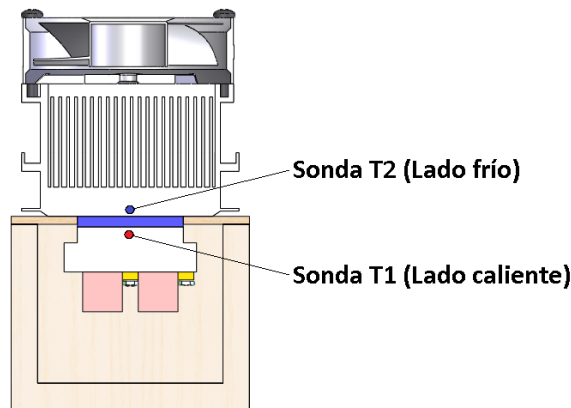


Figura 31. Esquema del posicionamiento de las sondas de Tº

Por otro lado, a la red eléctrica y mediante un transformador de voltaje se conecta el ventilador, cuya función será la de mantener la temperatura del disipador y consecuentemente la del lado frío de la celda Peltier debido a la unión, lo más cerca de la temperatura ambiente posible a fin de garantizar una gran diferencia de temperaturas entre las dos caras de la celda. En caso de no disponer de este elemento, se tendría que confiar en la convección natural del aire para que mantuviese esta diferencia de calor. En tal caso, se tendría que aportar mucha más potencia a las resistencias para conseguir los mismos efectos, comprometiendo la integridad de la celda Peltier.

5.2.3 Circuito eléctrico secundario

La instalación eléctrica del circuito secundario es la mostrada en la figura de abajo, siendo la celda Peltier la que alimenta el potenciómetro.

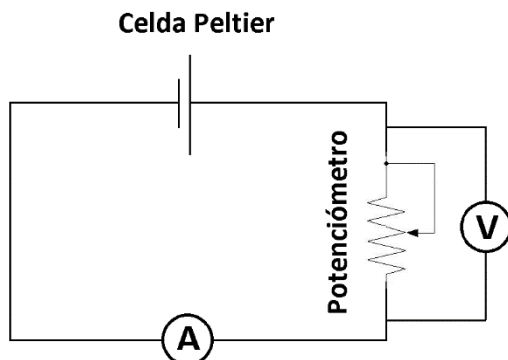


Figura 32. Esquema eléctrico del circuito secundario cuya fuente de energía es la celda Peltier

Los 2 multímetros son los encargados de leer los datos de amperaje y voltaje necesarios para la realización del experimento, están conectados en serie y paralelo respectivamente con la carga.



Figura 33. Modelo real funcional

5.3 FUNCIONAMIENTO

Sabiendo ya como es el sistema utilizado, su funcionamiento es intuitivo, y comprensible, y siempre manteniendo un bajo coste a fin de poder replicarse en otras universidades o en el futuro realizar un dispositivo más maduro tomando como base el creado para este trabajo.

Una vez fijada la potencia del generador, se encienden todos los dispositivos electrónicos, ventilador, termómetro y multímetros, y se deja funcionando hasta que las temperaturas interior (T_c) y exterior (T_f) dejen de variar en el tiempo, probablemente al inicio del experimento las dos serán iguales a la temperatura ambiente (T_a) y a medida que pase el tiempo se irán distanciando, entonces se habrá conseguido el estado estacionario.

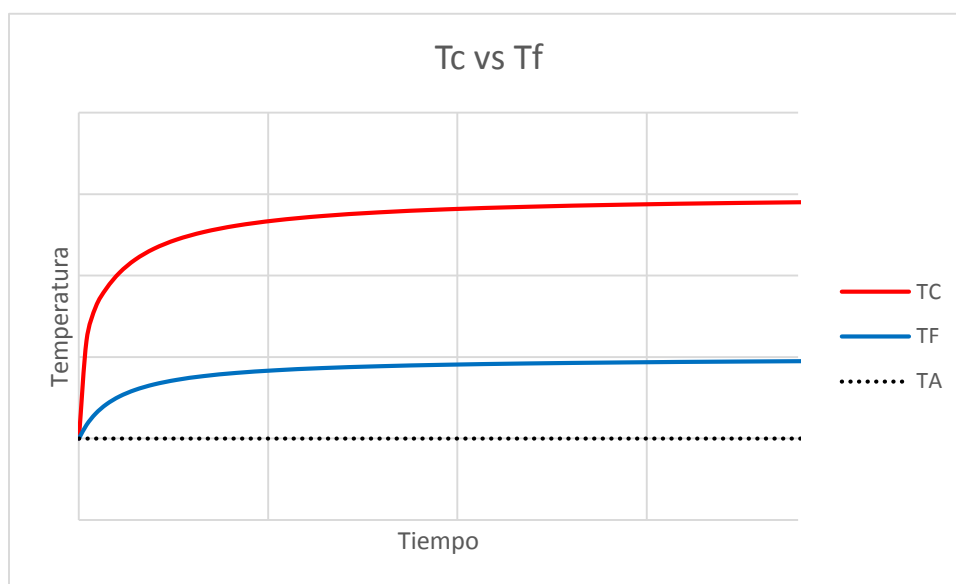


Figura 34. Gráfico del comportamiento de T_f y T_c en función del tiempo

La figura 34 muestra el comportamiento esperado de la temperatura en las caras fría y caliente de la celda Peltier, los valores de tiempo para conseguir el estado estacionario rondan los 30 minutos tal y como se mostrará más adelante en un experimento realizado exclusivamente para determinar el tiempo de espera necesario antes de proceder con la toma de datos,

El momento de estado estacionario es el instante en el cuál se puede proceder con la realización del experimento, pues es cómo funcionan la mayoría de dispositivos de este tipo,

y además, los datos obtenidos serán mucho más fiables y las curvas extraídas de estos más regulares ya que la lectura de los resultados no dependerá del momento en el que se efectúen.

Este proceso se ha realizado para diferentes potencias iniciales, ya que por cada potencia se obtiene un gradiente de temperaturas distinto, a más potencia, mayor gradiente, y también, al menos esto se espera, un comportamiento de la celda distinto.

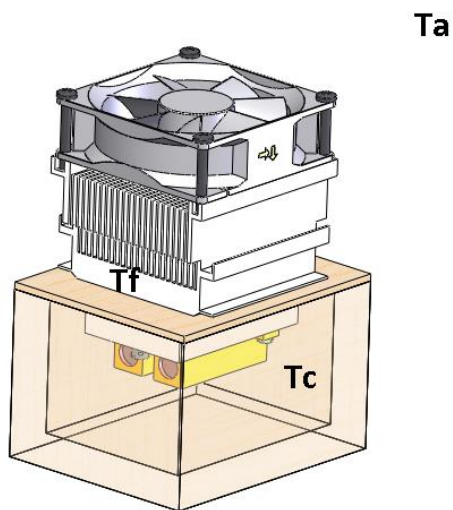


Figure 35. Esquema de las diferentes temperaturas que se observan en el dispositivo

Como se puede ver en la figura, el interior del recipiente de madera se encuentra a T_c (temperatura caliente) así como las resistencias, el conector térmico, la cara caliente de la Peltier y la sonda de Temperatura T_1 introducida dentro del conector. A T_f (temperatura fría) se encuentran el lado frío de la celda, la sonda de temperatura T_2 y también la parte inferior del disipador. Mientras que T_a es la temperatura ambiente de la sala que tiene un despreciable efecto sobre las dos temperaturas estudiadas.

El objetivo del recipiente es el de aprovechar al máximo la potencia suministrada por la fuente, y también asegurar que la temperatura de la sonda T_1 y la de la cara caliente de la celda son iguales y también aislar estos componentes del enfriamiento debido al aire que empuja el ventilador sobre ellos. Mientras que el trabajo principal del ventilador es refrigerar de una forma forzada la parte fría de la Peltier mediante el disipador, pues con él se consiguen

mejores resultados que con la convección natural del aire, y también diferencias entre T_f y T_c mucho mayores, cosa que repercute en una eficiencia superior de la celda Peltier.

En cada grupo de tomas de datos, la potencia suministrada a las resistencias y también al ventilador (este último no tenía ningún control de potencia) se han mantenido constantes, pero lo que si se ha modificado, es la resistencia que ofrecía el potenciómetro conectado a la celda, ya que como se ha visto a la parte teórica anteriormente, la potencia del circuito depende de la resistencia interna.

6. TOMA DE DATOS

La finalidad del experimento, es poder estudiar la eficiencia, voltaje y potencia que proporciona la celda Peltier que se dispone en diferentes condiciones de diferencia de temperatura y para diferentes resistencias internas con el fin de poder caracterizarla para un caso más general.

Y de este modo construir un sistema asequible económicamente y sencillo para poder entender y construirlo para otros fines educativos en un futuro.

Se han realizado tres tipos distintos de tomas de datos, todas con una finalidad distinta, a continuación se exponen y se explica porque y como se han realizado

6.1 CALCULO DEL TIEMPO DE PREPARACIÓN

Como se ha expuesto anteriormente, la toma de datos no puede empezar una vez conectada la fuente y el ventilador, para conseguir unos resultados veraces se debe esperar a que las diferencia de temperaturas entre las caras de la celda Peltier dejen de variar a fin de contar con las mismas condiciones desde el inicio de la toma de datos hasta el final.

El tiempo de espera dependerá de la potencia suministrada por la fuente, cuando se estudie el comportamiento con 40W las temperaturas de trabajo serán más bajas y consecuentemente se estabilizarán antes que cuando la potencia suministrada sea de 68W.

Con el fin de medir dicho tiempo de espera se ha encendido el dispositivo con una potencia suministrada por la fuente fijada en 65W, y se ha conectado el ventilador al mismo tiempo y se ha puesto en marcha el cronómetro, a partir de aquí se ha tomado la medida de la diferencia de temperaturas cada minuto hasta que esta deje de variar.

Los valores obtenidos se ven reflejados en la figura 36 que en efecto tiene la forma que se pronosticó en el apartado anterior.

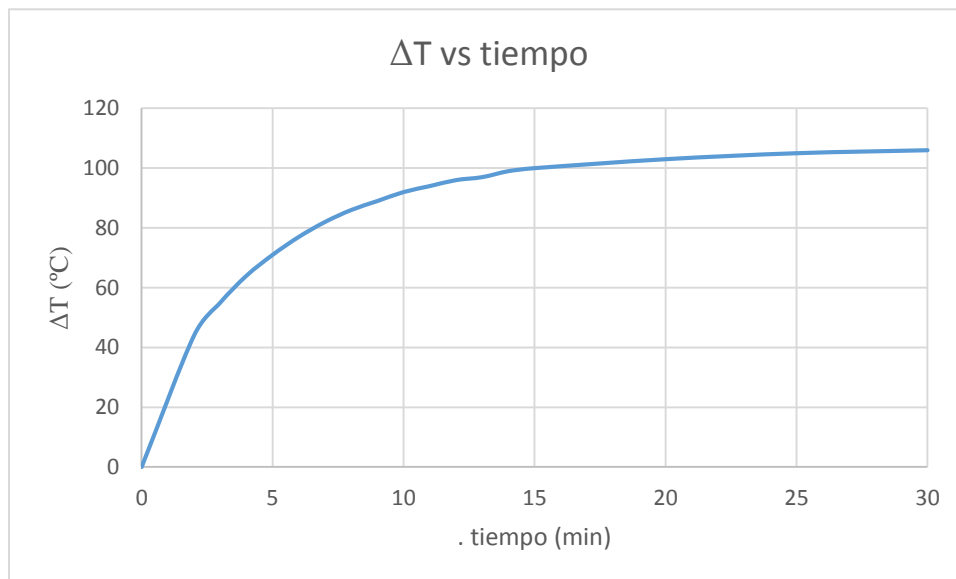


Figura 36. Tiempo de estabilización de la temperatura

6.2 CURVAS DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA

6.2.1 Metodología

En cada grupo de tomas de datos, se mantendrá constante la diferencia T_1-T_2 fijando la potencia dada y esperando hasta que se consiga el estado estacionario, es decir, que el sistema esté en equilibrio y tanto en el inicio como en el final de cada toma de datos las condiciones sean iguales. Entonces se podrá comenzar la toma de datos.

Para poder obtener todos los datos deseados, se ha tenido que trabajar con dos distintas configuraciones del circuito, cerrado y abierto, el primero nos muestra todos los valores de Intensidad y voltaje en función de la resistencia, es decir los valores que se ven alterados por esta, mientras que la segunda configuración muestra los parámetros que se mantienen constantes durante la toma de datos, que son el voltaje en vacío y el valor de α que podrá ser calculado a posteriori.

Los rangos de potencia suministrada estudiados se comprenden entre 40W y 70W, siendo el máximo valor estudiado 68W, que significó un ΔT de 112°C arrojando una T_1 de 152°C.

No se ha estudiado más allá debido a dos causas, la primera es que la fuente no permitía ofrecer mucho más de 70W, y la segunda es la propia resistencia térmica de la celda Peltier que según su ficha técnica adjunta en el anexo, no se garantiza que aguante más de 160°C

6.2.1.1 Circuito cerrado

Potencia (W)	T1 (°C)	T2 (°C)	ΔT (°C)	Volt. con carga (V)	Intensidad (mA)	Resistencia	Pot. Peltier (W)
-----------------	------------	------------	--------------------	------------------------	--------------------	-------------	---------------------

Tabla 2. Parámetros obtenidos en la toma de datos (Circuito cerrado)

En la hoja de toma de datos, estos son los parámetros que se obtendrán en cada toma de datos:

Celdas verdes: Estos son los datos que se obtienen de la lectura directa de los dispositivos de medición. Proviene del termómetro tanto T1 como T2, ΔT , es la resta de T1 menos T2, y nos refleja la diferencia de temperaturas entre cara fría y caliente, que se puede calcular, aunque el mismo termómetro ya te la muestra. Y la intensidad y el voltaje de dos multímetros diferentes mostrados con anterioridad. La Potencia, viene dada por la misma fuente de tensión.

Celdas azules: Los valores de las celdas azules provienen de triviales operaciones partiendo de las lecturas obtenidas durante la toma de datos. La resistencia se refiere a la que proporciona el potenciómetro, y es el resultado de aplicar la ley de ohm con los valores de “I” y “V” leídos durante la prueba, de la misma forma, con la multiplicación de estas dos lecturas, se obtendrá la potencia de la carga (Pot. Peltier).

Cada uno de los mencionados parámetros, se evaluará para una resistencia de carga distinta pues como ya se ha comentado, la potencia obtenida en el circuito depende de su resistencia interna, para poder comprobarlo y además encontrar la resistencia óptima (la resistencia que permite una mayor potencia en el circuito) se ha partido de un valor de 10 u 11 ohm aproximadamente y se ha ido modificando descendientemente este valor en intervalos de 0,2 a 0,5 ohm hasta llegar a los 1,5-2 ohm.

No se ha considerado una resistencia mayor debido a que las formulas teóricas ya convergen a una solución de 7-5 ohm, y no se han tomado datos menores a 1 ohm por tal de no cortocircuitar el sistema y poder dañar la celda.

6.2.1.2 Circuito abierto

Antes de proceder con las lecturas de todos los parámetros variando la resistencia ofrecida por el potenciómetro, se desconectará esta resistencia de la celda Peltier, dejando el circuito tal y como muestra la figura 14.

Tensión en vacío (V)	α
-------------------------	----------

Tabla 3. Parámetros obtenidos en la toma de datos (Circuito abierto)

La tensión en vacío se obtiene directamente del valor que muestra el multímetro conectado a los dos polos de la placa Peltier, mientras que “ α ” se obtiene de la división del voltaje en vacío entre la diferencia de temperaturas a la cual se ve sometida la celda.

6.2.2 Observaciones y mejoras

Durante el pos proceso de los datos, se observó un comportamiento inusual en la curva que describía el parámetro alpha en función de la diferencia de temperaturas a la cual estaba sometida la celda.

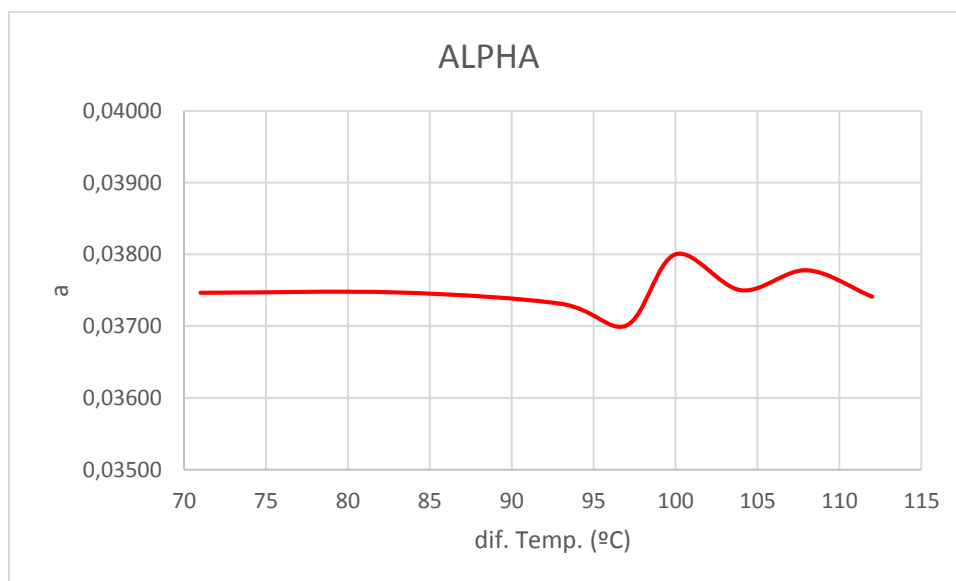


Figure 37. Comportamiento sospechoso de alpha.

Se esperaba que este parámetro siguiese una ecuación parecida a una parábola, por lo que este comportamiento cuestionó la fiabilidad de las tomas de datos. A pesar de que los valores son coherentes y muy concentrados en un mismo punto (rebajando la escala del eje “Y” del gráfico se vería una recta), se estudió el porqué de esta forma.

Finalmente se observó que desde que se empieza la toma de datos con la carga conectada hasta que se termina, a pesar de que al inicio se llegó al estado estacionario, al final de la lectura de todas las mediciones, la diferencia de temperaturas ΔT había variado. Esto es debido a sollicitación energética de la carga, pues cuando se modificaba el valor de resistencia R_L también modificaba la potencia que la celda absorbía del sistema modificando así las temperaturas fría y caliente a las cuales la celda estaba sometida.

Esto no supone un error significativo durante la toma de datos con el circuito cerrado, pues la diferencia de temperaturas entre todas las tomas de datos no llega en ningún caso a más de 3°C , pero sí que influyó el hecho de analizar la tensión en vacío antes o después de esta toma de datos, pues el valor de ΔT podía ser 3°C mayor en una toma, y 3°C menor en la siguiente, pudiendo provocar una diferencia de 6°C respecto la realidad.

Por este motivo, se realizó otro experimento, explicado a continuación.

6.3 CURVA DE VOLTAJE EN VACÍO EN FUNCIÓN DE TEMPERATURA

Se hizo otro experimento que consistió en ir subiendo de forma gradual la potencia suministrada, desde 0W hasta 70W controlando en todo momento y a tiempo real tanto la diferencia de temperatura entre la cara caliente y la fría como el voltaje en vacío que suministró la celda. Es decir, cada vez que la diferencia de temperaturas ΔT se incrementaba en 5°C, se apuntaba el valor de voltaje.

Vo (V)	ΔT (K)	alpha (V/K)
2,88	75	0,03840
3,09	80	0,03863
3,29	85	0,03871
3,48	90	0,03867
3,67	95	0,03863
3,86	100	0,03860
4,04	105	0,03848
4,22	110	0,03836
4,41	115	0,03835

Tabla 4. Valores de Voltaje en vacío en función de ΔT .

De este modo se consiguió un estudio rápido y preciso del Voltaje en vacío en función de la diferencia de temperatura que permitió hallar el alpha en cada escenario. La tabla 4 muestra los valores obtenidos durante la realización del experimento.

Para comprobar la veracidad de las lecturas obtenidas el experimento se realizó, una vez se llegó a la ΔT de más de 115 K, de forma inversa, partiendo desde la máxima diferencia de temperatura y observando el Voltaje en vacío para cada ΔT , donde se observó que los resultados dieron el mismo valor que en el primer recorrido, demostrando también que la celda no tiene histéresis.

7. RESULTADOS

7.1 RESISTENCIA INTERNA

Puesto que todas las fórmulas teóricas anteriormente mostradas y deducidas dependen de tanto la resistencia variable de la carga como de la resistencia interna de la celda, lo más sensato será hallar el valor de la resistencia interna a partir de los datos obtenidos.

Gracias a la simplificación del circuito usando el teorema de Thévenin, hallar el valor de la

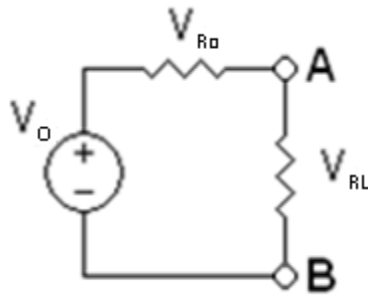


Figure 38. Voltajes en las cargas.

resistencia interna R_0 será relativamente sencillo.

En un circuito en serie con una sola fuente, el voltaje total de esta, es igual a la suma de la pérdida de potencial en cada carga, por lo que se obtiene que $V_0 = V_{R_0} + V_{R_L}$.

El valor de V_0 , se ha encontrado para cada distinta diferencia de temperaturas mediante el segundo experimento explicado con anterioridad. Mientras que el valor de V_{R_L} se ha calculado con el primer experimento para cada diferencia de temperaturas y para cada valor de R_L .

Consecuentemente, podrá hallarse el valor de V_{R_0} para cada distinta resistencia de carga y diferencia de temperaturas.

Una vez hallado V_{Ro} , con los valores de intensidad para las mismas diferencias de temperaturas y resistencias de carga, aplicando la ley de ohm, se podrá hallar el valor de la resistencia interna de la celda Peltier.

La ecuación 22 es la que se utiliza para obtener los siguientes resultados.

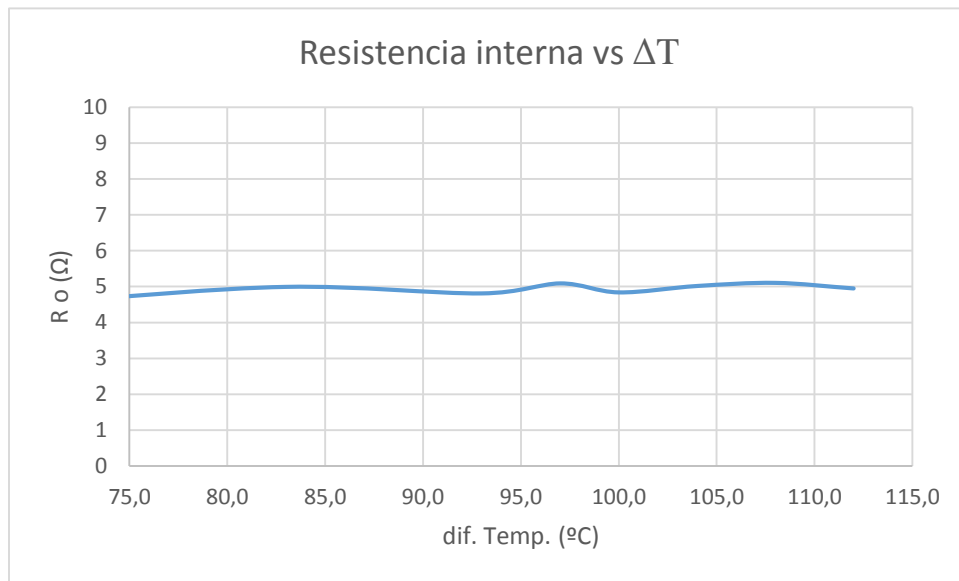


Figure 39. Valor de la resistencia interna de la celda Peltier.

Como se ve en la gráfica de arriba, el valor de esta resistencia sigue una tendencia lineal de valor constante de 5Ω con ligeras perturbaciones, que pueden verse producidas por simples aproximaciones decimales en las tomas de datos, pero se puede asumir, para los fines de este trabajo, que la resistencia interna de la celda Peltier tiene un valor constante de 5Ω , al menos para el rango de temperaturas e intensidades en los cuales nos movemos durante la realización de este trabajo.

7.2 RESISTENCIA ÓPTIMA

Al igual que en todos los grupos, la potencia máxima obtenida de la celda, se obtiene entre los $4\ \Omega$ y los $6\ \Omega$, por lo que se extrae que la resistencia óptima no es proporcional al ΔT , como se ve en la figura. Pero sí que es muy próxima a la resistencia interna del circuito.

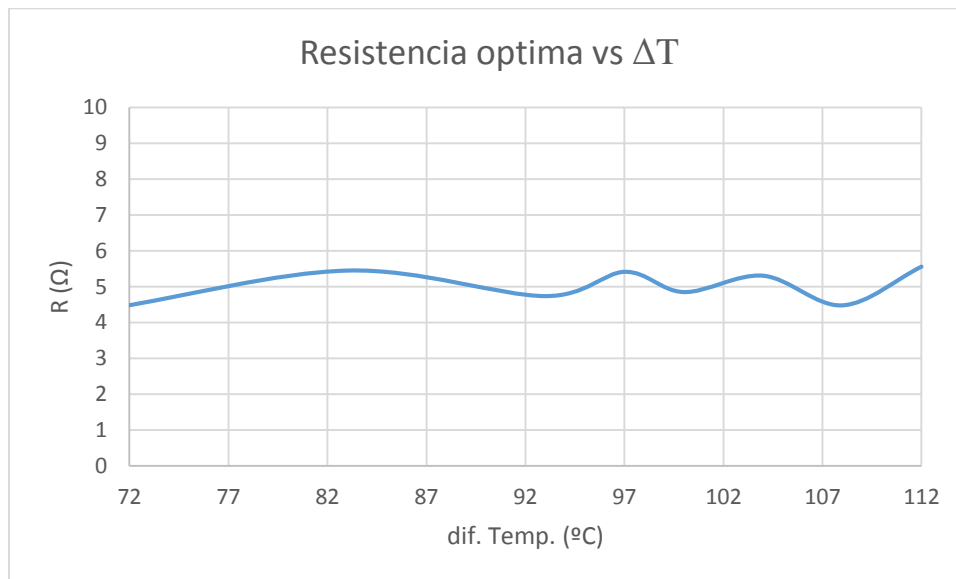


Figure 40. Resistencia optima vs dif. temperaturas T_1 - T_2

Este comportamiento se debe a que la potencia del circuito depende de la resistencia total del circuito, la cual está compuesta por la resistencia variable del potenciómetro R_L y la resistencia interna de la celda R_0 , durante los ensayos la R_L se ha controlado. Estas oscilaciones respecto al valor medio de los resultados, al igual que el valor de la resistencia interna, puede ser debido a la falta de precisión en la toma de datos, o también a la variación de la resistencia de los componentes en función de la temperatura a la cual están sometidos y la cantidad de corriente que los atraviesa.

7.3 VOLTAJE EN VACÍO

Durante la caracterización del sistema construido, también se ha podido medir o calcular en este caso, otros factores interesantes para este componente. El primero es el coeficiente de Seebeck (α) que es un parámetro de los termopares que indica el Voltaje que pueden generar a partir de una diferencia de temperatura.

Para encontrarlo, es necesario primero obtener los valores de Voltaje en vacío para cada ΔT , como se ha explicado anteriormente, esta toma de datos se realizó de una manera más rápida y directa, sin ningún tipo de resistencia externa.

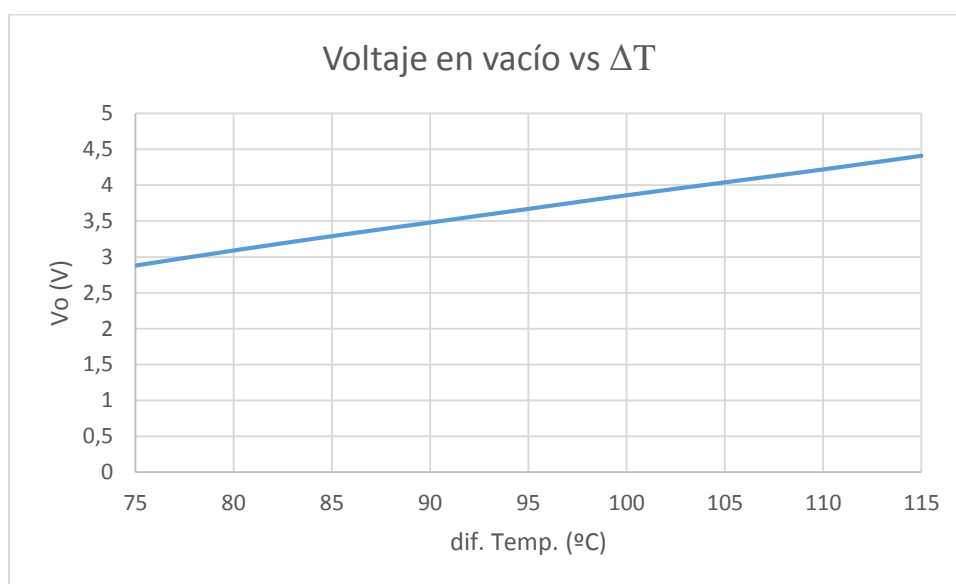


Figure 41. Voltaje en vacío vs dif. temperaturas (T_1-T_2)

Como se aprecia en la figura, el resultado fue muy interesante, observándose un comportamiento muy lineal casi ideal, demostrando la proporcionalidad entre la diferencia de temperatura y el voltaje que se obtiene.

7.4 COEFICIENTE DE SEEBECK

A partir de los datos del apartado anterior, y la ecuación que enuncia que la α es la división entre el voltaje en vacío y la diferencia de temperatura, podremos obtener la siguiente curva. El valor del coeficiente de Seebeck o α , es obtenido mediante la ecuación de Seebeck (1).

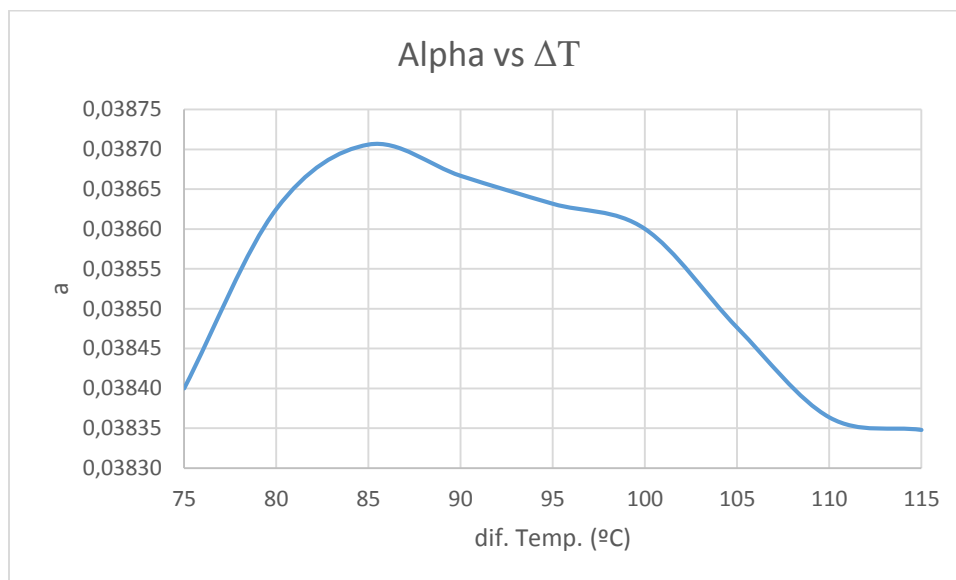


Figure 42. Coeficiente de Seebeck vs dif. temperaturas T1-T2

Aunque la gráfica parece una parábola muy marcada, es necesario mencionar que el eje “y” muestra un rango de valores muy pequeño por lo que realmente se trata de una parábola con muy poca variación, casi horizontal.

Por lo que se podría considerar el valor de α prácticamente constante, esto explica que la gráfica experimental anterior de V_0 respecto ΔT , sea casi perfectamente lineal.

Es necesario mencionar que el coeficiente α no depende de la resistencia asociada de carga al circuito, consecuentemente, dentro de cada diferencia de temperatura, el α permanece constante, solo dependiendo de la propia celda Peltier y de la diferencia de temperaturas ΔT .

7.5 POTENCIA MÁXIMA

Como ya se esperaba desde que se han deducido las ecuaciones en la parte teórica, la potencia máxima extraída del sistema es proporcional al gradiente de temperatura al cual se expone la celda al cuadrado, dando los datos experimentales una función con tendencia creciente al igual que su pendiente.

La ecuación teórica ha sido obtenida mediante la ecuación 24 que muestra la potencia máxima extraíble del circuito en función de la resistencia interna, la diferencia de temperaturas y el parámetro alpha o coeficiente de Seebeck.

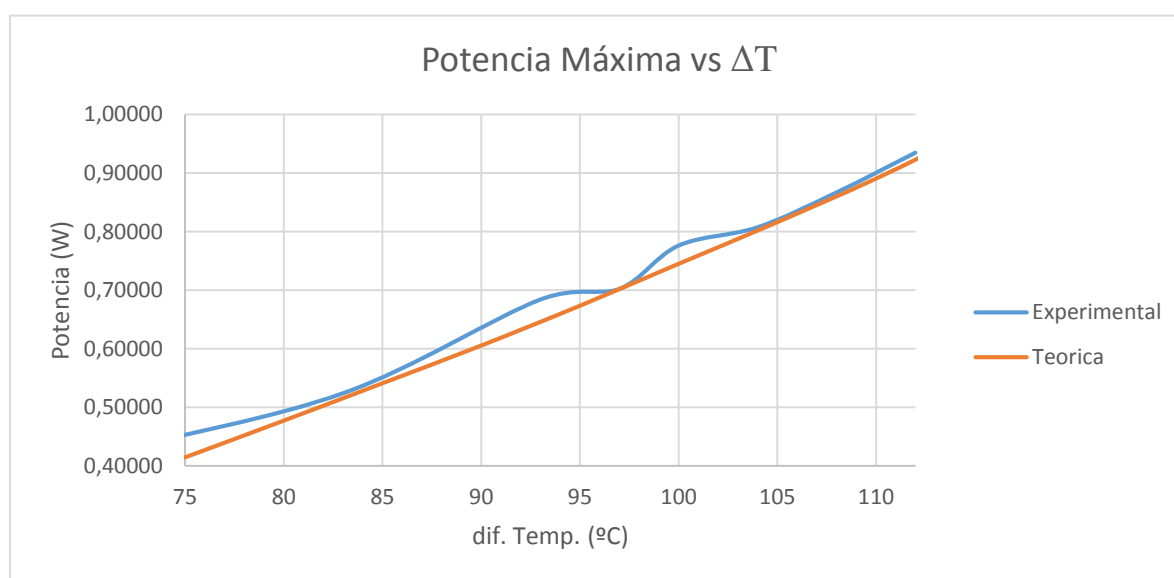


Figure 43. Potencia maxima vs dif. temperaturas T1-T2 (Teórica y experimental)

Como se ha hallado anteriormente, la resistencia interna R_0 de la celda, se puede considerar 5Ω para todo el rango de diferencias de temperaturas estudiado, a partir de este valor, y con los valores de alpha hallados, es posible calcular la potencia máxima que puede suministrar la celda Peltier.

Aunque hay pequeñas discrepancias entre las dos líneas, se pueden dar por buenos los valores obtenidos, pues la tendencia de la curva experimental es igual a la curva teórica.

7.6 EFICIENCIA DE LA CELDA PELTIER

Para tener datos sobre la cantidad de energía que se puede generar con una celda Peltier, se ha elaborado la siguiente gráfica que muestra su eficiencia, es decir, la cantidad de energía térmica que puede llegar a transformar en energía eléctrica.

Para esto se ha aplicado la fórmula $\frac{P_u}{P_c} = e$ que enuncia que la eficiencia de un dispositivo será la potencia útil dividida entre la potencia consumida. Para realizar este cálculo se ha hecho la división entre la potencia máxima extraída para cada diferencia de temperaturas estudiado dividida entre la potencia que suministraba la fuente de energía para alcanzar dicha ΔT , pero a esta última se le ha restado la potencia disipada a través del contenedor, pues estas pérdidas no son causadas por la placa Peltier.

La eficiencia del dispositivo ha resultado verse incrementada con la diferencia de temperatura a la cual está expuesta, aunque como se puede comprobar, a partir de un ΔT de 105° esta se estanca llegando a un máximo de 2,1% en los ensayos efectuados.

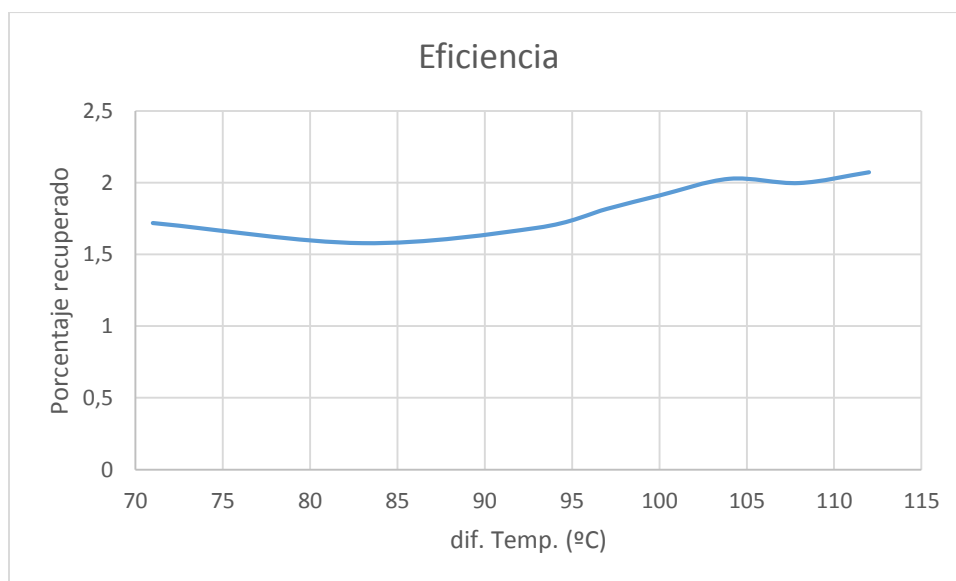


Figure 44. Eficiencia celda Peltier vs dif. temperaturas T1-T2

Estos porcentajes parecen insignificantes a primera vista, pero el objetivo de las placas Peltier no es el de generar energía, sino otro concepto muy similar a la práctica pero fundamentalmente distinto, aprovecharla.

Con este gráfico, no se puede extraer una ecuación clara que defina la eficiencia del dispositivo estudiado por cada diferencia de temperaturas, pero sí que da una idea muy clara del potencial que tienen las placas Peltier. Pues se puede deducir que para todo el rango utilizable de temperaturas, la eficiencia rondará estos valores.

7.7 COMPORTAMIENTO DE LA CELDA EN FUNCIÓN DE ΔT Y R_T

El gráfico que mejor resume todo el proyecto, es el siguiente, donde se muestra en el mismo, la relación entre la potencia obtenida en la carga estudiada junto con las dos variables que se podían controlar, la diferencia de temperatura y la resistencia variable de la carga.

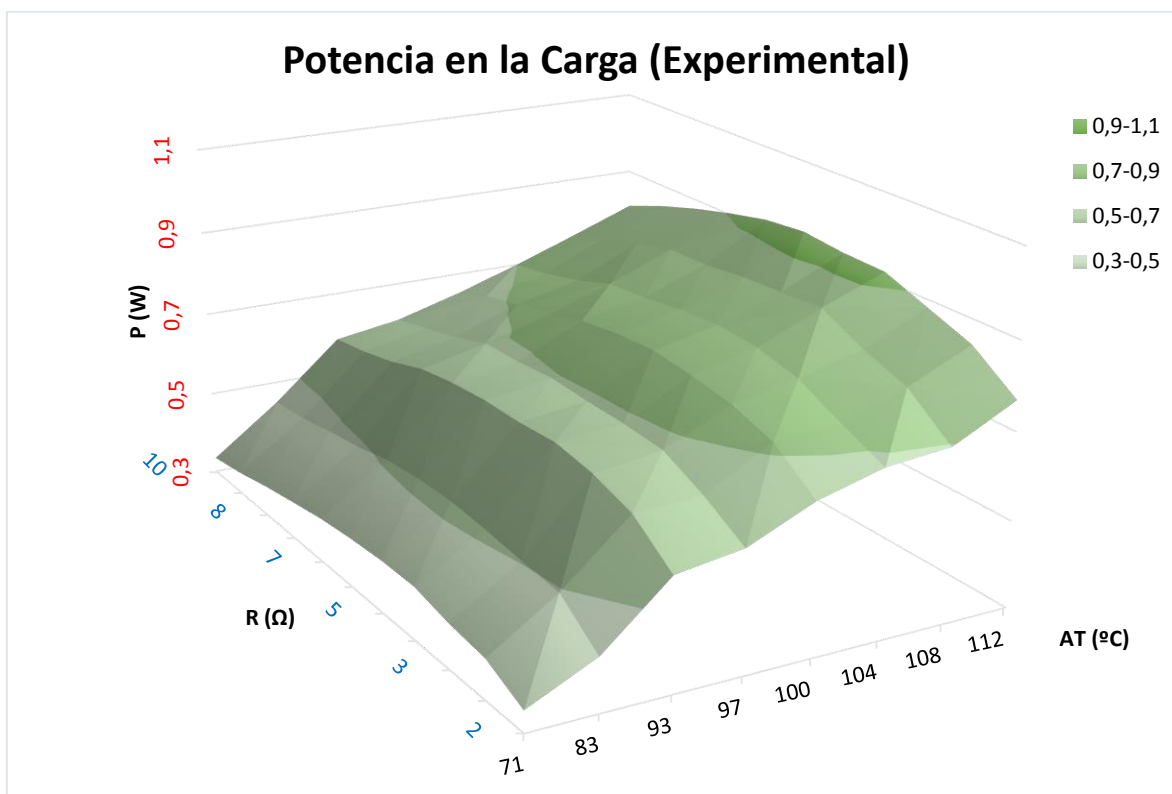


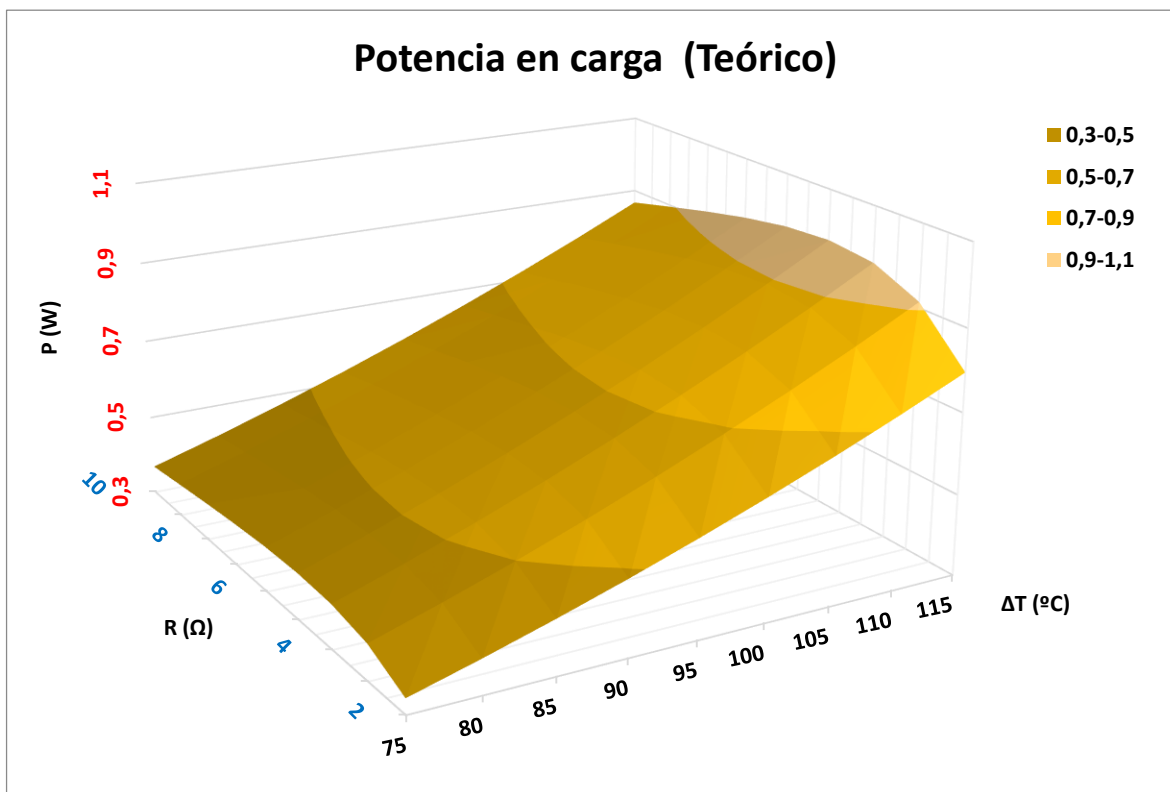
Figure 45. Gráfico de Potencia en función de dif. Temp. y Resistencia

Este gráfico ha sido obtenido empíricamente, calculando la potencia con la multiplicación de los valores de intensidad y voltaje en la carga obtenidos durante cada experimento para una resistencia R_L y una diferencia de temperaturas ΔT específica de cada lectura.

Se observa que el máximo de potencia da lugar independientemente de la diferencia de temperaturas a la zona de los 5Ω , mientras que la potencia es proporcional a la diferencia de temperaturas a la cual la celda Peltier se ve expuesta.

Sin embargo dicho gráfico se puede ajustar a una fórmula teórica para poder saber la fidelidad de las ecuaciones anteriormente mencionadas con los datos empíricos del experimento.

Así pues, a partir de la fórmula teórica 28 anteriormente deducida, se puede hacer un *plot* 3D de la potencia en la carga en función de la diferencia de temperaturas y la resistencia de la misma carga.



Para poder realizar esta función, se ha tenido que usar los valores de R_0 y α evaluados a partir de los datos empíricos pues para calcularlos teóricamente se tendría que poseer mucha más información sobre la celda de la que se muestra en el “*datasheet*”.

La realización de esta función ciertamente evidencia la veracidad de los resultados obtenidos, pues una vez más, los datos empíricos observados se ajustan a lo que cabe esperar de las fórmulas teóricas deducidas al inicio de este trabajo.

8. PRESUPUESTO

Como se ha mencionado con anterioridad, uno de los objetivos de este prototipo es la sencillez y ser asequible económicamente. A continuación se expone una tabla con los costes asociados a este trabajo.

	Cantidad	Precio/unidad	PVP
COMPONENTES DEL MODELO			
Celda Peltier	1	17,99	17,99
Resistencia 18R	2	3,30	6,60
Ventilador	1	11,50	11,50
Disipador de calor	1	7,86	7,86
Potenciómetro	1	4,57	4,57
Material y mecanizado placa Al	1	150,00	150,00
Fungibles	1	20,00	20,00
Subtotal			218,52
MATERIAL INVENTARIABLE			
Multímetro 7182	1	17,70	17,70
Multímetro MAS830	1	12,50	12,50
Termómetro digital	1	45,38	45,38
Fuente de tensión ajustable	1	139,00	139,00
Subtotal			214,58
ENSAMBLAJE CONJUNTO			
Mano de obra	4	20	80,00
Subtotal			80,00
TOTAL			513,10

Tabla 5. Presupuesto del prototipo en €, con IVA incluido

La tabla precedente muestra el precio total de la realización de este modelo, incluidos todos los dispositivos de medición, que podrían o no mencionarse, por según que fines, pues son dispositivos muy comunes en centros educativos. Por lo que el precio de este sistema podrá finalmente verse reducido dependiendo de dónde se decida montar.

También se ha añadido un tiempo de montaje estimado en 4 horas, a un precio de referencia de 20€/h, que es el salario del profesor de universidad medio en Catalunya aproximadamente.

Un elemento que puede parecer desorbitadamente caro, es el conector térmico entre la placa y las resistencias, pues este precio por una pieza de tan reducidas dimensiones de aluminio es efectivamente caro. Pero en este precio no solo se incluye el material, sino que también hay reflejado el coste de máquina, el tiempo de preparación de la misma y el coste de las horas empleadas por el operario para poder realizar todo este proceso. Este se vería reducido si la producción fuese por varias piezas, pues todo el tiempo de preparación se mantendría de la máquina constante y se dividiría entre el número de piezas bajando el precio unitario en consecuencia.

9. PROPUESTAS DE SEGUIMIENTO DEL TRABAJO

Actualmente, se pueden adquirir celdas Peltier de importación a un precio mucho más competitivo alrededor de 2€ la unidad. Aunque estas no suelen ir acompañadas de ficha técnica con todas sus especificaciones, para la finalidad de este proyecto sería muy interesante hacerse con unas a fin de caracterizarlas y compararlas con las alternativas más caras que se pueden encontrar en tiendas especializadas.

Esto supondría dos ventajas para un proyecto de estas características, el primero sería la obvia reducción del coste de fabricación, y la segunda sería la de estudiar un modelo poco conocido e integrado en la unión europea con el cual, si dispusiera de unas características técnicas reales semejantes a las celdas disponibles a nuestro país, se podrían abaratar de una forma muy significativa los sistemas que emplean estos dispositivos electrónicos.

De los valores extraídos se podría comparar la relación calidad/precio de las usadas en este experimento y las de importación de menor coste, y a partir de allí realizar un estudio económico-energético a fin de sacar conclusiones para usarlas en proyectos industriales o domésticos.

10. CONCLUSIONES

El dispositivo creado con la finalidad de caracterizar la celda Peltier, ha dado un resultado satisfactorio, ofreciendo lecturas verosímiles acorde con los valores teóricos previamente calculados.

Este nos ha permitido pues caracterizar una celda Peltier comercial en un rango de diferencias de temperaturas de entre 70°C y 115°C aproximadamente. Arrojando para cada uno de estos valores un voltaje en vacío determinado que nos ha permitido determinar el parámetro más característico de la celda, el coeficiente de Seebeck, también referido como “ α ”. Además se ha cuantificado la potencia máxima extraíble de esta celda para cada diferencia de temperaturas a la cual está sometida, cosa muy práctica y con verdaderas aplicaciones comerciales.

Habría sido interesante comparar estos valores con valores oficiales suministrados por el fabricante, pero el “*Datasheet*” de la celda sólo da valores de voltaje y potencia térmica que genera la celda cuando se le aplica un voltaje, es decir, el fabricante sólo da valores utilizando la celda de la forma inversa que se ha estudiado en el trabajo.

En conclusión, este trabajo ha sido muy útil desde un punto de vista ingenieril pues engloba varias categorías de este mundo, termodinámica, y electricidad principalmente, aunque también ha sido necesario introducirse dentro del campo de la química cuándo se ha estudiado su estructura interna. Aunque habría sido interesante profundizar más en el estudio de la celda, ampliando el rango de temperaturas y comparándola con otros modelos de la competencia.

11. BIBLIOGRAFÍA

- 1 <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/PELTIER.htm>
- 2 http://www.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXI/documentos/ja00_016/ja00_016.pdf
- 3 <http://www.utm.mx/~mtello/Extensos/extenso020709.pdf>
- 4 <http://kryothermtec.com>
- 5 <http://www.motorauthority.com>
- 6 <http://www.spf-modul.com/en/support/constructionen.html>
- 7 <http://www.iit.upcomillas.es/palacios/thermo/climamed2006.pdf>

12. ANEXO

12.1 DATOS OBTENIDOS EN LOS EXPERIMENTOS

12.1.1 Datos para potencia suministrada de 40W.

potencia (W)	T _c (°C)	T _f (°C)	Volt. con carga (V)	Intensidad (mA)	Resistencia (Ω)	Potencia Peltier (W)
40	102	31	1,88	0,18	10,4	0,3384
40	102	31	1,86	0,18	10,3	0,3348
40	102	31	1,84	0,19	9,7	0,3496
40	102	31	1,81	0,2	9,1	0,3620
40	102	31	1,76	0,21	8,4	0,3696
40	102	31	1,74	0,22	7,9	0,3828
40	102	31	1,68	0,23	7,3	0,3864
40	102	31	1,64	0,24	6,8	0,3936
40	102	31	1,61	0,25	6,4	0,4025
40	102	31	1,56	0,26	6,0	0,4056
40	102	31	1,53	0,27	5,7	0,4131
40	102	31	1,47	0,28	5,3	0,4116
40	102	31	1,45	0,29	5,0	0,4205
40	102	31	1,39	0,3	4,6	0,4170
40	102	31	1,36	0,31	4,4	0,4216
40	102	31	1,31	0,32	4,1	0,4192
40	102	31	1,22	0,34	3,6	0,4148
40	102	31	1,15	0,35	3,3	0,4025
40	102	31	1,03	0,38	2,7	0,3914
40	102	31	0,91	0,41	2,2	0,3731
40	102	31	0,81	0,43	1,9	0,3483
40	102	31	0,74	0,44	1,7	0,3256
40	102	31	0,62	0,47	1,3	0,2914

12.1.2 Datos para potencia subministrada de 50W.

potencia (W)	T _c (°C)	T _f (°C)	Volt. con carga (V)	Intensidad (mA)	Resistencia (Ω)	Potencia Peltier (W)
40	102	31	1,88	0,18	10,4	0,3384
40	102	31	1,86	0,18	10,3	0,3348
40	102	31	1,84	0,19	9,7	0,3496
40	102	31	1,81	0,2	9,1	0,3620
40	102	31	1,76	0,21	8,4	0,3696
40	102	31	1,74	0,22	7,9	0,3828
40	102	31	1,68	0,23	7,3	0,3864
40	102	31	1,64	0,24	6,8	0,3936
40	102	31	1,61	0,25	6,4	0,4025
40	102	31	1,56	0,26	6,0	0,4056
40	102	31	1,53	0,27	5,7	0,4131
40	102	31	1,47	0,28	5,3	0,4116
40	102	31	1,45	0,29	5,0	0,4205
40	102	31	1,39	0,3	4,6	0,4170
40	102	31	1,36	0,31	4,4	0,4216
40	102	31	1,31	0,32	4,1	0,4192
40	102	31	1,22	0,34	3,6	0,4148
40	102	31	1,15	0,35	3,3	0,4025
40	102	31	1,03	0,38	2,7	0,3914
40	102	31	0,91	0,41	2,2	0,3731
40	102	31	0,81	0,43	1,9	0,3483
40	102	31	0,74	0,44	1,7	0,3256
40	102	31	0,62	0,47	1,3	0,2914

12.1.3 Datos para potencia subministrada de 53W.

potencia (W)	T _c (°C)	T _f (°C)	Volt. con carga (V)	Intensidad (mA)	Resistencia (Ω)	Potencia Peltier (W)
52,9	127	34	2,44	0,23	10,6	0,5612
52,9	127	34	2,43	0,24	10,1	0,5832
52,9	127	34	2,39	0,25	9,6	0,5975
52,9	127	34	2,33	0,26	9,0	0,6058
52,9	127	34	2,29	0,27	8,5	0,6183
52,9	127	34	2,23	0,28	8,0	0,6244
52,9	127	34	2,2	0,29	7,6	0,6380
52,9	127	34	2,16	0,3	7,2	0,6480
52,9	127	34	2,12	0,31	6,8	0,6572
52,9	127	34	2,07	0,32	6,5	0,6624
52,9	127	34	2	0,33	6,1	0,6600
52,9	127	34	1,97	0,34	5,8	0,6698
52,9	127	34	1,92	0,35	5,5	0,6720
52,9	127	34	1,86	0,36	5,2	0,6696
52,9	127	34	1,8	0,38	4,7	0,6840
52,9	127	34	1,74	0,39	4,5	0,6786
52,9	127	34	1,69	0,4	4,2	0,6760
52,9	127	34	1,6	0,42	3,8	0,6720
52,9	127	34	1,5	0,44	3,4	0,6600
52,9	127	34	1,41	0,46	3,1	0,6486
52,9	127	34	1,31	0,48	2,7	0,6288
52,9	127	34	1,19	0,51	2,3	0,6069
52,9	127	34	1,12	0,52	2,2	0,5824
52,9	127	34	1,01	0,55	1,8	0,5555
52,9	127	34	0,97	0,55	1,8	0,5335

12.1.4 Datos para potencia subministrada de 55W.

potencia (W)	T _c (°C)	T _f (°C)	Volt. con carga (V)	Intensidad (mA)	Resistencia (Ω)	Potencia Peltier (W)
55	135	38	2,53	0,24	10,5	0,6072
55	135	38	2,48	0,25	9,9	0,6200
55	135	38	2,42	0,26	9,3	0,6292
55	135	38	2,36	0,27	8,7	0,6372
55	135	38	2,33	0,28	8,3	0,6524
55	135	38	2,28	0,29	7,9	0,6612
55	135	38	2,2	0,31	7,1	0,6820
55	135	38	2,14	0,32	6,7	0,6848
55	135	38	2,01	0,34	5,9	0,6834
55	135	38	1,98	0,35	5,7	0,6930
55	135	38	1,95	0,36	5,4	0,7020
55	135	38	1,89	0,36	5,3	0,6804
55	135	38	1,86	0,37	5,0	0,6882
55	135	38	1,83	0,38	4,8	0,6954
55	135	38	1,76	0,39	4,5	0,6864
55	135	38	1,69	0,4	4,2	0,6760
55	135	38	1,58	0,43	3,7	0,6794
55	135	38	1,49	0,44	3,4	0,6556
55	135	38	1,35	0,47	2,9	0,6345
55	135	38	1,25	0,49	2,6	0,6125
55	135	38	1,11	0,52	2,1	0,5772
55	135	38	0,96	0,55	1,7	0,5280
55	135	38	0,83	0,57	1,5	0,4731
55	135	38	0,71	0,6	1,2	0,4260

12.1.5 Datos para potencia subministrada de 58W.

potencia (W)	Tc (°C)	Tf (°C)	Volt. con carga (V)	Intensidad (mA)	Resistencia (Ω)	Potencia Peltier (W)
57,6	135	35	2,6	0,25	10,4	0,6500
57,6	135	35	2,58	0,26	9,9	0,6708
57,6	135	35	2,54	0,27	9,4	0,6858
57,6	135	35	2,49	0,28	8,9	0,6972
57,6	135	35	2,44	0,29	8,4	0,7076
57,6	135	35	2,39	0,3	8,0	0,7170
57,6	135	35	2,34	0,31	7,5	0,7254
57,6	135	35	2,26	0,33	6,8	0,7458
57,6	135	35	2,22	0,34	6,5	0,7548
57,6	135	35	2,16	0,35	6,2	0,7560
57,6	135	35	2,08	0,37	5,6	0,7696
57,6	135	35	2,04	0,38	5,4	0,7752
57,6	135	35	1,99	0,39	5,1	0,7761
57,6	135	35	1,94	0,4	4,9	0,7760
57,6	135	35	1,88	0,41	4,6	0,7708
57,6	135	35	1,78	0,43	4,1	0,7654
57,6	135	35	1,7	0,445	3,8	0,7565
57,6	135	35	1,63	0,46	3,5	0,7498
57,6	135	35	1,52	0,49	3,1	0,7448
57,6	135	35	1,38	0,52	2,7	0,7176
57,6	135	35	1,26	0,55	2,3	0,6930
57,6	135	35	1,11	0,58	1,9	0,6438
57,6	135	35	0,94	0,62	1,5	0,5828
57,6	135	35	0,74	0,66	1,1	0,4884

12.1.6 Datos para potencia subministrada de 60W.

potencia (W)	T _c (°C)	T _f (°C)	Volt. con carga (V)	Intensidad (mA)	Resistencia (Ω)	Potencia Peltier (W)
60	143	39	2,71	0,25	10,8	0,6775
60	143	39	2,69	0,26	10,3	0,6994
60	143	39	2,66	0,27	9,9	0,7182
60	143	39	2,56	0,29	8,8	0,7424
60	143	39	2,46	0,31	7,9	0,7626
60	143	39	2,35	0,33	7,1	0,7755
60	143	39	2,28	0,34	6,7	0,7752
60	143	39	2,24	0,35	6,4	0,7840
60	143	39	2,2	0,36	6,1	0,7920
60	143	39	2,16	0,37	5,8	0,7992
60	143	39	2,12	0,38	5,6	0,8056
60	143	39	2,07	0,39	5,3	0,8073
60	143	39	2,01	0,4	5,0	0,8040
60	143	39	1,95	0,41	4,8	0,7995
60	143	39	1,9	0,42	4,5	0,7980
60	143	39	1,82	0,44	4,1	0,8008
60	143	39	1,77	0,45	3,9	0,7965
60	143	39	1,68	0,47	3,6	0,7896
60	143	39	1,62	0,48	3,4	0,7776
60	143	39	1,49	0,5	3,0	0,7450
60	143	39	1,4	0,52	2,7	0,7280
60	143	39	1,31	0,54	2,4	0,7074
60	143	39	1,22	0,56	2,2	0,6832
60	143	39	1,06	0,59	1,8	0,6254
60	143	39	0,91	0,62	1,5	0,5642

12.1.7 Datos para potencia subministrada de 65W.

potencia (W)	T _c (°C)	T _f (°C)	Volt. con carga (V)	Intensidad (mA)	Resistencia (Ω)	Potencia Peltier (W)
65	148	40	2,81	0,27	10,4	0,7587
65	148	40	2,79	0,27	10,3	0,7533
65	148	40	2,75	0,28	9,8	0,7700
65	148	40	2,71	0,29	9,3	0,7859
65	148	40	2,67	0,3	8,9	0,8010
65	148	40	2,62	0,31	8,5	0,8122
65	148	40	2,56	0,32	8,0	0,8192
65	148	40	2,52	0,33	7,6	0,8316
65	148	40	2,46	0,34	7,2	0,8364
65	148	40	2,41	0,35	6,9	0,8435
65	148	40	2,33	0,36	6,5	0,8388
65	148	40	2,27	0,37	6,1	0,8399
65	148	40	2,24	0,38	5,9	0,8512
65	148	40	2,18	0,39	5,6	0,8502
65	148	40	2,14	0,4	5,4	0,8560
65	148	40	2,09	0,41	5,1	0,8569
65	148	40	2,05	0,42	4,9	0,8610
65	148	40	1,97	0,44	4,5	0,8668
65	148	40	1,92	0,45	4,3	0,8640
65	148	40	1,86	0,46	4,0	0,8556
65	148	40	1,81	0,47	3,9	0,8507
65	148	40	1,74	0,48	3,6	0,8352
65	148	40	1,69	0,49	3,4	0,8281
65	148	40	1,63	0,5	3,3	0,8150
65	148	40	1,6	0,51	3,1	0,8160
65	148	40	1,52	0,53	2,9	0,8056
65	148	40	1,44	0,54	2,7	0,7776
65	148	40	1,38	0,55	2,5	0,7590
65	148	40	1,2	0,58	2,1	0,6960
65	148	40	1,08	0,61	1,8	0,6588

12.1.8 Datos para potencia subministrada de 68W.

potencia (W)	T _c (°C)	T _f (°C)	Volt. con carga (V)	Intensidad (mA)	Resistencia (Ω)	Potencia Peltier (W)
68	152	40	2,93	0,28	10,5	0,8204
68	152	40	2,89	0,28	10,3	0,8092
68	152	40	2,86	0,29	9,9	0,8294
68	152	40	2,82	0,3	9,4	0,8460
68	152	40	2,78	0,31	9,0	0,8618
68	152	40	2,74	0,32	8,6	0,8768
68	152	40	2,69	0,33	8,2	0,8877
68	152	40	2,64	0,34	7,8	0,8976
68	152	40	2,58	0,35	7,4	0,9030
68	152	40	2,53	0,36	7,0	0,9108
68	152	40	2,5	0,37	6,8	0,9250
68	152	40	2,43	0,38	6,4	0,9234
68	152	40	2,38	0,39	6,1	0,9282
68	152	40	2,32	0,4	5,8	0,9280
68	152	40	2,28	0,41	5,6	0,9348
68	152	40	2,22	0,42	5,3	0,9324
68	152	40	2,15	0,43	5,0	0,9245
68	152	40	2,08	0,44	4,7	0,9152
68	152	40	2,03	0,45	4,5	0,9135
68	152	40	1,96	0,47	4,2	0,9212
68	152	40	1,85	0,49	3,8	0,9065
68	152	40	1,79	0,5	3,6	0,8950
68	152	40	1,73	0,51	3,4	0,8823
68	152	40	1,6	0,54	3,0	0,8640
68	152	40	1,48	0,57	2,6	0,8436
68	152	40	1,33	0,6	2,2	0,7980
68	152	40	1,24	0,62	2,0	0,7688
68	152	40	1,03	0,66	1,6	0,6798

12.2 FICHA TÉCNICA DE LA CELDA PELTIER UTILIZADA



marlow industries inc.®

Thermoelectric Cooler

DT12-6

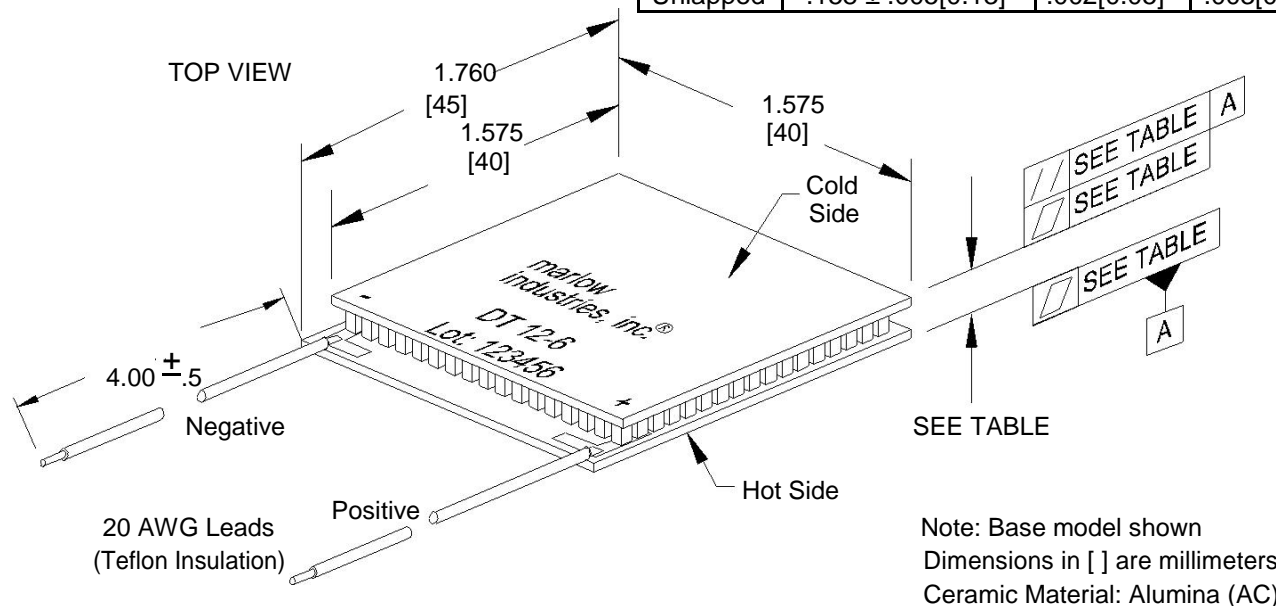
Performance Values

Hot Side Temperature (°C)	27°C	50°C
ΔT_{max} (°C-dry N ₂):	66	74
Q _{max} (watts):	54	60
I _{max} (amps):	5.6	5.6
V _{max} (vdc):	14.7	16.4
AC Resistance (ohms):	2.2	---



Mechanical Characteristics

	Height	Flatness	Parallelism
Lapped	.154 ± .001[0.03]	.001[0.03]	.002[0.05]
Unlapped	.158 ± .005[0.13]	.002[0.05]	.003[0.08]



Ordering Options

Model Number	Description
DT12-6-01	Base Model
DT12-6-01L	Lapped Model
DT12-6-01S	Sealed Model
DT12-6-01LS	Lapped and Sealed Model

Features

- ☐ Solid state reliability
- ☐ Built with high temperature solder with the ability to withstand higher assembly processing temperatures for short periods of time (<160°C)
- ☐ Superior nickel diffusion barriers on elements
- ☐ High strength for rugged environment
- ☐ Porched configuration for improved leadwire strength
- ☐ RTV sealing option available to improve reliability in

condensing environment

module applications.

- ☐ Lapped option available for multiple
-

102-0155, Rev D

Performance Curves

Environment: One atmosphere dry nitrogen

Hot Side Temperature: 27°C

Hot Side Temperature: 50°C

